

THESES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

POUR OBTENIR
LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

PAR

Monsieur CLAUDE RIDÉ



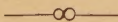
Sujet de la 1^{re} THESE

ETUDE DES ECHANGES THERMIQUES AU COURS DE LA CUISSON
DES PRODUITS CERAMIQUES
APPLICATION A LA REDUCTION DES CYCLES DE CUISSON

Sujet de la 2^e THESE

ETUDE DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE DES SOLIDES

Soutenues le 4 juin 1969 devant la Commission

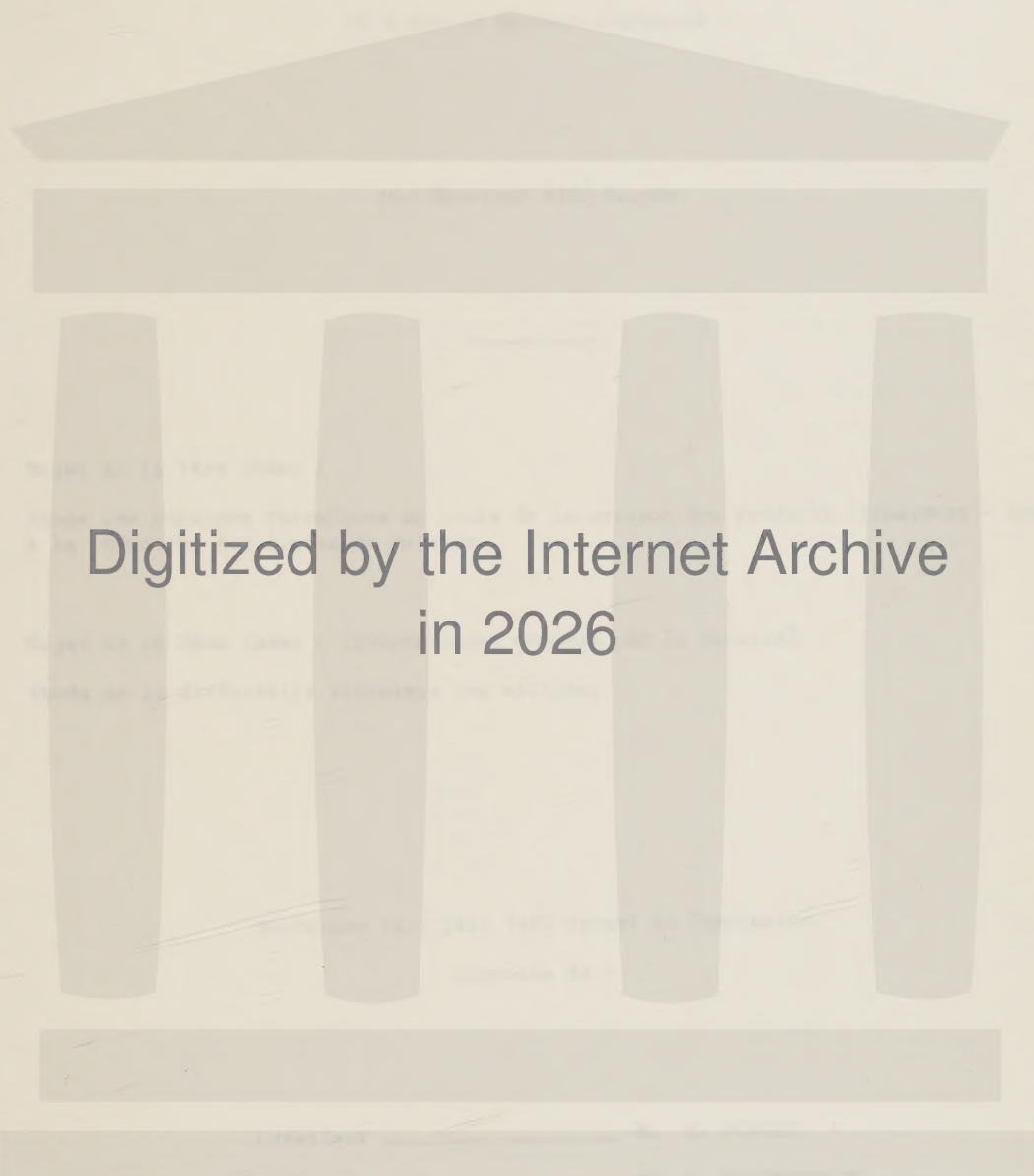


COMPOSÉE de :

Président : H. PONCIN

Examineurs : $\left\{ \begin{array}{l} \text{R. VICHNIEVSKY} \\ \text{C. MONNET} \end{array} \right.$

Invités :



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552201_0017

T H E S E S

Présentées

A LA FACULTE DES SCIENCES DE PARIS

Pour obtenir

le Titre de Docteur-Ingénieur

par Monsieur RIDÉ Claude

Sujet de la 1ère thèse :

Etude des Echanges Thermiques au cours de la cuisson des produits céramiques - Application à la réduction des cycles de cuisson.

Sujet de la 2ème thèse : (propositions données par la Faculté)

Etude de la diffusivité thermique des solides.

Soutenues le 4 juin 1969 devant la Commission

composée de :

Président M. H. PONCIN

Examineurs MM. R. VICHNIEVSKY

..... C. MONNET

Invité



Je t'embrasse, mon fils Lionel
Avec toute mon affection et mon amour
Ton père et ta mère
A Lionel

A mon fils Lionel

Maman
Papa

De lui-même, notre esprit incline sans cesse, non seulement à clarifier (ce qui est sa fonction), mais à rétrécir et à écourter les réalités qu'il touche.

Pierre Teilhard de Chardin.
(Le Phénomène Humain)

JANVIER 1967

UNIVERSITE DE PARIS
FACULTE DES SCIENCES DE PARIS
PROFESSEURS

Le Doyen M. ZAMANSKY

GRASSE	T Evolution des êtres organisés	Mlle CAUCHOIS	T Chimie Physique
PREVOST	T Chimie organique	THELLIER	T Physique du Globe
WYART	T Minéralogie et cristallographie	PONCIN	T Mécanique générale
TEISSIER	T Zoologie	DUBREIL	T Arithmétique et Théorie des nombres
AUGER	T Physique quantique et relativité		
MONNIER	T Physiologie générale		
PIVETEAU	T Paléontologie	CAGNIARD	T Géophysique appliquée
ROCARD	T Physique E.N.S.	CHAMPETIER	T Chimie macromoléculaire
CARTAN	T Mathématiques E.N.S.	CUVILLIER	T Micropaléontologie
LAFFITTE	T Chimie générale		
COULOMB	T Physique du globe	WIEMANN	T Chimie organique et structurale
		VASSY	T Physique de l'atmosphère
CHRETIEN	T Chimie minérale	DESTOUCHES	T Théorie physique
BOCQUET	T Zoologie	AMIEL	T Chimie générale
KASTLER	T Physique E.N.S.		
EPHRUSSI	T Génétique	J.P. MATHIEU	T Physique optique
GAUTHERET	T Biologie végétale CPEM	COUTEAUX	T Cytologie
LUCAS R.	Recherches physiques	CHOQUET	T Théorie des fonctions et topologie
THOMAS A.	T Biologie	FELDMANN	T Biologie végétale marine
MORAND	T Physique enseignement	JOST	T Physiologie comparée
SOLEILLET	T Physique CPEM	FORTET	T Calcul des probabilités et physique mathématiques
FORTIER	T Mécanique expérimentale des fluides	SCHWARTZ	T Calcul différentiel et intégral
DRACH	T Biologie maritime	CHOUARD	T Physiologie végétale
QUENEY	T Météorologie et dynamique de l'atmosphère	MALAVARD	T Aviation (technique aéronautique)
GALLIEN	T Embryologie	BRELOT	T Analyse supérieure
EICHHORN	T Botanique	NORMANT	T Synthèse organique
		YVON	T Théories physiques
BENARD	T Chimie appliquée	COTTE	T Physique électricité

...

DUGUE	T Statistique méthématique	DUBOIS J.E.	T Chimie organique physique
SOULAIRAC	T Psychophysiologie	LAMOTTE	T Zoologie E.N.S.
ULRICH	T Physiologie végétale appliquée	OLMER	T Energétique générale
KIRRMANN	T Théories chimiques	GAUTHIER	T Mécanique appliquée
CHADEFAUD	T Botanique	BARCHEWITZ	T Chimie physique
Mlle LE BRETON	T Physiologie de la nutrition	BROSSEL	T Physique atomique
LELONG	T Application de l'analyse à la géométrie	BUSER	T Physiologie comparée
DEVILLERS	T Anatomie comparée	CAMUS	T Physiologie végétale
EHRESMANN	T Topologie algébrique	CURIEN	T Minéralogie et cristallographie
		POSSOMPES	T Zoologie
FRANÇON	T Physique SPCN	PULLMANN	T Chimie quantique
GLANGEAUD	T Géographie physique, géologie dynamique	TEILLAC	T Physique nucléaire et radio-activité
GODEMENT	T Mathématiques MGP	VILLE	T Econométrie
PISOT	T Technique mathématique de la physique		
ROCH	T Géologie	FREYMAN	T Recherches physiques
SCHATZMANN	T Astrophysique	ROLLET	T Chimie minérale
TERMIER	T Géologie générale	Mlle JOSIEN	T Chimie SPCN
ZAMANSKY	T Mathématiques générales	CHEVALLEY	T Géométrie algébrique et théorie des groupes
LENNUIER	T Physique M.G.P.	GERMAIN	T Mécan. Théo. des fluides
ROUTHIER	T Géologie appliquée	LUCAS G.	T Géologie
Mme TONNELAT	T Physique théorique	ALLARD	T Chimie physique
DIXMIER	T Mathématiques M.P.C.	BERTHELOT	T Physique des particules fondamentales
SOUCHAY	T Chimie générale	BRICARD	T Météorologie
AIGRAIN	T Electrotechnique	Mme ALBE-FESSARD	T Psycho-physiologie
BRUSSET	T Chimie systématique		
LEVY	T Physique théorique des hautes énergies	M. JULIA	T Etude des molécules naturelles complexes
Mme CHAIX	T Chimie biologique	MAGAT	T Physico-chimie des rayonnements
Mme HUREL PY	T Biologie végétale CPEM		
PANNETIER	T Chimie générale I	MONOD	T Chimie du métabolisme
BRUN	T Mécanique des fluides I	DE POSSEL	T Analyse numérique
Mme DUBREIL	T Mathématiques (Agrégation)	CHARLOT	T Chimie analytique
Mme LELONG	T Mathématiques II E.N.S.	CHATELET	T Chimie CPEM
BELLAIR	T Géologie S.P.C.N.	MATTLER	T Physique SPCN
BOUSSIÈRES	T Radiochimie	AUBOUIN	T Géologie
Mme COUTURE	T Thermodynamique et mécanique	Mme BENOIT-GUEUTAL	T Physique nucléaire et radioactivité
FRANC	Biologie animale CPEM	BOUGIS	Biologie végétale marine Villefranche s/mer
SCHNELL	T Botanique tropicale		
STOLKOWSKI	T Physiologie générale	RIGAUDY	T Chimie SPCN
ACHER	T Chimie biologique	COLLONGUES	T Chimie appliquée
BAUDOIN	T Biologie animale CPEM	DUBERT	Biochimie
BEAUMONT	Biologie animale SPCN	NOZIERES	T Physique fondamentale

...

BLAMONT	Géophysique ionosphère	CADIOT	Chimie organique
BOUREAU	T Botanique	IVANOFF	T Océanographie physique
CURIE D.	Physique MGP	FRANÇOIS	Zoologie
DURAND DELGA	T Géologie	TALBOT	Génie chimique
HELLER	T Physiologie végétale	Mme NOUGAREDE	Botanique
TORTRAT	T Calcul des probabilités	BRUHAT	T Mathématiques MPC
CAILLEUX	T Géologie SPCN	FOURNET	Electricité générale
MAGNAN	T Physique électricité	DEHEUVELS	T Mathématiques propédeutique
DAUDEL	T Mécanique ondulatoire	FURON	T Géologie SPCN
Mme CHOQUET BRUHAT	T Mécanique analytique et mécanique céleste	Mme GANS	T Génétique
		GENEVES	Biologie végétale CPEM
		HUPE	T Pétrographie
Mlle VEIL	T Physiologie générale	HOLLANDE	T Biologie générale
LWOFF	T Microbiologie	LIONS	T Analyse numérique
SIESTRUNCK	T Mécanique physique et expérimentale	MAITTE	T Chimie organique
CABANNES	T Mécanique théorique	NICOLAS	Géologie appliquée
CAIRE	T Géographie physique et géologie dynamique	PANIGEL	Biologie générale
		RAVIER	T Pétrographie
COMOLET	T Mécanique des fluides	MOREL F.	T Physiologie comparée
DELLOUE	T Physique de l'exosphère	ROSEAU	T Mécanique théorique des fluides
HOUILLON	T Biologie animale	ROUBINE	T Electronique E.S.E.
OLIVIER	T Anthropologie	SILBER	T Chimie CPEM
SAMUEL	T Mathématiques (ENS Jeunes filles)	UEBERSFELD	T Electronique
THIRY	T Mécanique céleste	HERVE	T Mathématiques
ABELES	T Physique SPCN	Mme PECKER-WIMEL	T Astrophysique
AMAT	T Thermodynamique		
BALKANSKI	Physique M.P.C. 1	TAVERNIER	Physique PC
LE CORRE	T Electricité	DURAND Michel	Biologie animale SPCN
NATAF	T Physique nucléaire et radioactivité	PASCAUD	Physiologie
		Mme PETIT	Biologie animale CPEM
ECHALIER	Biologie animale CPEM	CAGNAC	Electricité
BARRAUD	T Physique CPEM	FALK-VAIRANT	Physique nucléaire
DARS	Géologie structurale et appliquée	KRASNER	T Mathématiques
CAMEFORT	Botanique (Agrégation)	BENZECRI	T Statistiques
VICHNIEWSKY	T Mécanique industrielle	VINH MAU	Physique M.G.P.
SIGWALT	Chimie SPCN	DUQUESNES	Physique CPEM
BLAQUIERE	Automatique	SCHUTZENBERGER	T Programmation
BARUCH	Physique propédeutique	TREMILLON	Chimie MPC
ARNOUS	T Physique théorique	FAYARD	Chimie MPC
SLONINSKI	Génétique	BUVET	Chimie CPEM
MALLIAVIN	T Mathématiques propédeutique	AUTHIER	Minéralogie et cristallographie
GAUDEMAR	Chimie propédeutique		
BROUSSE	T Mécanique théorique	BONNEFILLE	Electrotechnique

...

ROSCH	T Astronomie	Mme PUISEUX DAO	Biologie végétale
GUY	T Physique expérimentale	BERGER	T Géométrie supérieure
LAZARD	T Mathématiques MPC	Mlle LIBERMANN	T Mathématiques
MOREL P.	Physique MPC	DEDONDER	T Biologie cellulaire
ARSAC	Programmation	DUFOUR	T Electronique I.U.T.
LEFEBVRE	T Chimie MPC	SCHAAL	Chimie CPEM
BOK	Physique fondamentale	BAUCHOT	Anatomie comparée
CHAPEVILLE	Biochimie	LANCE	BV CPEM
BENOIT	Physique CPEM	GIRAUD	Botanique E.N.S.
RIO	Chimie CPEM	HULIN	Physique P.C.
JAUZEIN	Géologie E.N.S.	VIGIER	Génétique
PREVOST G.	Biologie cellulaire	GUERN	Biologie végétale
FAVARD P.	Biologie animale CPEM	SLODZIAN	Physique CPEM
Mme CHARNIAUX-COTTON	Evolution des êtres organisés	LACOMBE	Logique mathématique
		TAVLITZKI	Biologie cellulaire
Mlle FICINI	Chimie CPEM	ARVIEU	Physique CPEM
LEQUEUX	Astronomie	TAXI	B.A. CPEM
COHEN TANNOUDJI	Physique atomique	COLLENOT	B.A. CPEM
		BASSELIER	Chimie propédeutique
		BADOUAL	Electronique I.U.T.

Le Secrétaire général,

R. POUILLAIN

Table des matières

	Page
Avant-propos	IV
Résumé	V
1. Introduction	1
1.1 But et justification de l'étude	2
1.2 Technique traditionnelle	2
1.21. Combustibles	2
1.22. Action de certains composants des combustibles sur le matériau céramique	4
1.23. Conséquences sur la technique de cuisson	4
1.24. Types de fours utilisés	5
1.25. Incidences thermiques	6
1.26. Incidences économiques	8
1.27. Conséquences générales	8
1.3 Technique moderne	9
1.31. Energie et combustibles	9
1.32. Absence d'impuretés	9
1.33. Conséquences sur la technique de cuisson	9
1.34. Types de fours utilisés	9
1.35. Incidences thermiques	10
1.36. Incidences économiques	12
1.37. Conséquences générales	13
1.4 Conclusions	13
2. Généralités sur les produits céramiques	15
2.1 Définition	15
2.2 Structure de l'industrie céramique française	15
2.3 Matières premières	15
2.31. Identification	15
2.32. Matières argileuses	16
2.33. Matières dégraissantes	16
2.34. Matières fusibles	17
2.4 Fabrication	18
2.41. Préparation des pâtes et barbotines	18
2.42. Façonnage	19
2.43. Séchage	19
2.44. Cuisson	21
2.45. Emaillage - décor	22
2.5 Classification	22

3. <u>Four expérimental</u>	26
3.1 Rappel de l'objectif	26
3.11 Choix des produits traités	26
3.12 Détermination des échanges thermiques	26
3.2 Cahier des charges	26
3.21 Conditions d'exploitation	26
3.22 Conditions d'échanges thermiques	27
3.23 Conditions relatives à la composition de l'atmosphère	28
3.3 Description du four expérimental	29
3.31 Conception générale	29
3.32 Laboratoire	29
3.33 Brûleurs	29
3.4 Equipement	30
3.41 Alimentation	30
3.42 Programmation	31
3.43 Métrologie	32
3.5 Essais préliminaires	33
4. <u>Considérations théoriques</u>	35
4.1 Définition de la méthode d'essais	35
4.11 Profil de la courbe de cuisson	35
4.12 Remarques préliminaires	35
4.13 Mode opératoire	35
4.14 Principaux défauts de cuisson et critères de qualité	36
4.2 Considérations théoriques sur les échanges thermiques en cours d'expérimentation	37
4.21 Hypothèses simplificatrices	37
4.22 Détermination analytique de la diffusion de la chaleur	39
4.23 Evaluation des échanges thermiques instantanés	42
5. <u>Expérimentation</u>	48
5.1 Réduction des cycles de la terre cuite	48
5.11 Carreaux	48
5.12 Brique	53
5.2 Réduction des cycles de la faïence	56
5.21 Cuisson de biscuit	56
5.22 Cuisson d'émail	59
5.3 Réduction des cycles du grès	61
5.31 Généralités sur le matériau	61
5.32 Détermination de la courbe de chauffage	62
5.33 Détermination de la courbe de refroidissement	63
5.34 Courbe résultante de cuisson	64
5.35 Evaluation des échanges thermiques	64

6. Conclusions générales

6.1 Produit céramique	67
6.2 Evolution de la technique de cuisson	67
6.3 Produits traités et four expérimental	67
6.4 Considérations théoriques	68
6.5 Expérimentation	69
6.6 Résultats	69
6.61 Température et durée des cycles	69
6.62 Densités de flux de chaleur	70
6.7 Application des résultats à l'élaboration du projet d'un four à passage industriel	71
Bibliographie	73
Nomenclature des annexes	77
Nomenclature des planches	79

Avant-propos

Très honoré par l'intérêt que Monsieur le Professeur H. PONCIN a bien voulu porter à cette étude, je voudrais lui témoigner ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie très vivement ses collaborateurs, Messieurs F. Collignon et J. Bransier, pour leurs précieux conseils, son élève, Monsieur P. Coppolani, pour sa participation aux mesures effectuées dans le Laboratoire d'Echanges Thermiques de la Faculté des Sciences de Paris, et Monsieur Ch. Imbert de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée d'Orsay, pour la détermination des caractéristiques de rayonnement du matériau de terre cuite.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur J. Charon, Président Directeur Général de la Société pour l'Utilisation Rationnelle des Gaz, qui a mis à ma disposition les moyens nécessaires à la réalisation de cette étude. Les encouragements que m'ont prodigués Monsieur C. Monnet, Directeur Technique, et Monsieur R. Laurent, alors Chef du Service Technique Application, m'ont permis d'entreprendre cette thèse. Monsieur L. Lanéry, successeur de Monsieur R. Laurent, m'a fait bénéficier, avec beaucoup de sympathie, de sa grande expérience en suivant le déroulement de ces travaux et la rédaction du manuscrit. Je lui en suis tout particulièrement reconnaissant. Enfin, je remercie mes collègues ingénieurs, techniciens, employés et ouvriers qui ont bien voulu, chacun dans son domaine, apporter leur concours à ce travail de recherche.

- Résumé -

La chaleur transmise au cours de la cuisson d'un produit céramique et l'atmosphère qui entoure ce produit provoquent sur ses composants des réactions physiques et chimiques qui ne s'effectuent correctement que dans certaines conditions. Dans ce domaine, comme dans bien d'autres, le développement de la technique met actuellement à la disposition des chercheurs et des ingénieurs des moyens nouveaux qui doivent permettre une amélioration des procédés de fabrication; mais pour pouvoir exploiter judicieusement ces possibilités, concevoir et mettre au point des procédés susceptibles de remplacer les procédés traditionnels, il est nécessaire d'effectuer au préalable une étude systématique et scientifique des échanges thermiques qui s'établissent au cours de la cuisson.

Cette étude constitue l'essentiel du travail présenté. Ce travail a été réalisé en partie au Laboratoire d'Echanges Thermiques de la Faculté des Sciences de Paris et en partie au Centre d'Essais de la Société pour l'Utilisation Rationnelle des Gaz de Levallois.

I - Etude des conditions à remplir pour l'élaboration d'un produit céramique

Pour expliquer le programme de recherches que nous avons adopté, il est nécessaire d'examiner les conditions dans lesquelles s'élaborent les produits céramiques. Les premières pages du mémoire résument donc l'analyse que nous avons effectuée à ce sujet. Nous y passons rapidement en revue les matières premières qui composent les produits céramiques en indiquant celles de leurs propriétés que nous aurons à utiliser. Nous analysons les principales étapes de la fabrication et nous précisons quelles sont les qualités que doivent avoir les produits finis (vitrification, texture, couleur, translucidité, résistances thermique, mécanique et électrique, etc...). Comme ces qualités dépendent essentiellement de l'action de la chaleur, nous sommes alors conduits à caractériser cette action. Nous rappelons qu'elle doit être progressive pour permettre aux différentes réactions chimiques (combustion des matières organiques, déshydratation des minéraux, décomposition des carbonates, vitrification des fondants, etc...) de s'effectuer en temps voulu, qu'elle doit être homogène pour que les dégagements gazeux, les dilatations et les retraits qu'engendrent ces réactions soient, à un instant donné, les mêmes en tous les points du matériau, qu'elle doit enfin être complétée par l'action d'une atmosphère contrôlée exempte d'impuretés (cendres, suies, soufre) car, au cours de la cuisson, ces impuretés provoqueraient des réactions chimiques indésirables.

On conçoit ainsi que la technique de cuisson est conditionnée par la nature du combustible générateur de cette atmosphère.

II - Etude théorique des problèmes posés

L'analyse précédente ayant permis de poser le problème au point de vue technique, nous cherchons à définir a priori les caractéristiques essentielles des phénomènes physiques correspondants.

Pour établir un modèle permettant cette détermination, il faut évidemment adopter un certain nombre d'hypothèses. Celles que nous avons jugées légitimes sont les suivantes : dans le domaine de températures où nous opérons, on peut remplacer les fonctions qui définissent les dimensions géométriques de l'échantillon et sa capacité calorifique par leurs valeurs moyennes et adopter une fonction de conductivité thermique de forme linéaire. La répartition des températures à l'intérieur de l'échantillon est suffisamment uniforme pour que l'on puisse définir un niveau thermique à partir de mesures effectuées au centre.

Nous avons analysé successivement les échanges thermiques qui s'établissent au cours de la cuisson entre l'échantillon et le milieu extérieur sous l'effet de la conduction, de la convection et du rayonnement. Nous avons montré qu'il était légitime d'effectuer les calculs en admettant d'une part que les caractéristiques physiques du fluide chauffant (mélange d'azote, de vapeur d'eau, d'anhydride et d'oxyde de carbone) étaient égales à celles de l'air à la même température et en admettant d'autre part que la circulation du fluide dans le four autour de l'échantillon s'effectuait de façon uniforme, le nombre de Reynolds étant compris entre 2.10^3 et $1,6.10^5$. Au sujet des échanges par rayonnement, nous avons montré que, dans les conditions où l'on opère, les formules de Lambert et de Bouguer sont valables et que l'on peut négliger l'influence exercée par les variations de température sur la valeur des facteurs d'émission monochromatiques.

Ces hypothèses nous ont permis d'expliciter la fonction de diffusivité thermique qui correspond à une variation linéaire de la température de surface de l'échantillon au cours du temps. Nous avons exprimé la densité du flux convectif en fonction des nombres de Reynolds, de Prandtl et de Nusselt, déterminé la densité du flux rayonné et établi le bilan général des échanges thermiques.

III - Conception et mise au point du dispositif expérimental d'essais

Pour vérifier la validité des résultats obtenus à partir des hypothèses de calculs énoncées ci-dessus et pour obtenir les valeurs numériques des différents paramètres introduits dans cette étude, il était nécessaire de construire un four expérimental.

Nous avons précisé dans un idéogramme les conditions que devait remplir l'installation d'essais en considérant d'abord les impératifs techniques (niveau de température à obtenir, caractéristiques de l'inertie, de la charge thermique, des effets de convection et de rayonnement, etc...) puis les conditions d'exploitation (sécurité, automaticité, coût d'exploitation, etc...).

Cette étude nous a conduits à envisager un four intermittent, permettant de simuler toutes les conditions d'un four continu de cuisson unitaire. Nous en avons défini les éléments essentiels (dimensions, caractéristiques thermophysiques des matériaux, etc...), les équipements annexes (alimentation, brûleurs, programmation) et les équipements métrologiques (enregistrement des températures en des points convenables, mesure des débits, détermination du taux d'aération du mélange air-gaz, composition de l'atmosphère, etc...).

Un four expérimental a été construit, sur ces bases, au Centre d'Essais de la Société U.R.G. à Levallois et nous en avons effectué la mise au point en étudiant de façon approfondie un échantillon particulier.

IV - Expérimentation

Après cette mise au point de l'appareillage, nous avons effectué l'étude de cinq types d'échantillons de produits céramiques, choisis de façon à représenter valablement l'ensemble des cas que l'on est susceptible de rencontrer dans la pratique. Les caractéristiques thermophysiques des éléments étudiés ont été déterminées avec précision en utilisant les méthodes mises au point au Laboratoire d'Echanges Thermiques de la Faculté des Sciences et les essais de cuisson ont été effectués dans le four du Centre d'Essais U.R.G. dont la description fait l'objet du § 3.

Nous avons établi pour chaque produit, des résultats de deux ordres : les uns concernent la fonction $T(t)$ qui relie la température au temps des cuissons les plus rapides possible, les autres concernent les densités de flux de chaleur transférée correspondantes.

Les températures finales sont identiques aux températures de cuisson traditionnelle ou leur sont légèrement supérieures (de 20 à 30°C). Par contre, les durées de cycles sont sensiblement inférieures. Par exemple, elles sont réduites dans les rapports de 5 à 1 pour le carreau de grès et de 40 à 1 pour la faïence (cuisson de biscuit). Elles correspondent respectivement à 9 heures et 0 heure 30.

Pour chacune des cuissons types, nous avons établi le bilan des échanges thermiques par convection et par rayonnement à quatre niveaux de température différents.

Nous avons enfin déterminé un spectre des densités de flux s'étendant de 100 à 15.000 Kcal(m)⁻²(h)⁻¹ et correspondant aux différentes contraintes qui limitent la vitesse du chauffage et du refroidissement.

V - Application des résultats de cette étude à l'élaboration du projet d'un four à passage industriel

L'étude présentée permet, en particulier, de préciser les conditions qu'il faut remplir pour fixer à sa durée minimale le cycle de cuisson unitaire de produits céramiques de terre cuite, de faïence et de grès cérame, pour assurer la reproductibilité des phénomènes et pour obtenir le meilleur rendement. A titre d'exemple, nous avons construit, en vue des applications pratiques, un abaque par points alignés qui permet d'évaluer la longueur que doivent avoir les fours industriels et nous avons envisagé diverses questions d'ordre économique que les utilisateurs sont obligés de prendre en considération.

Le mémoire se termine par 24 annexes, 41 planches et 94 références bibliographiques.

*

* *

CHAPITRE I

Introduction

1. INTRODUCTION

1.1. BUT ET JUSTIFICATION DE L'ETUDE

Nous nous proposons de déterminer les possibilités de cuisson rapide des principaux produits céramiques fabriqués industriellement. Le but de la cuisson est de provoquer certaines réactions et transformations chimiques et physiques des matières premières constituant les pâtes et vernis pour obtenir une matière nouvelle : le produit céramique (1).

Le résultat de cette opération dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- l'origine, la nature et la composition chimique des matériaux de base constituant les matières premières,
- la température à laquelle elles sont portées,
- le temps consacré à l'opération,
- la composition de l'atmosphère environnant les produits en cours de traitement.

Pour réagir contre la tendance de nombreux céramistes d'autrefois à considérer la cuisson céramique comme une simple opération de chauffe (2), d'importants travaux ont été consacrés à l'étude du premier de ces quatre facteurs ou à celle de leur interdépendance.

Il s'est donc produit un courant de pensée inverse, reléguant au second plan la contribution des échanges thermiques au résultat final. Le petit nombre d'études traitant de ces seuls problèmes de transfert de chaleur et l'absence quasi totale du vocabulaire spécifique (coefficient d'échanges, densité de flux, etc.) dans la bibliographie spécialisée ne peut s'expliquer uniquement par la complexité de ces problèmes. Cette carence nous paraît significative d'une époque où les échanges thermiques ne pouvaient être abordés de front, en raison des techniques de cuisson d'alors.

En tentant de justifier plus loin notre entreprise, nous soulignerons l'évolution de la cuisson céramique depuis qu'elle s'effectue de manière industrielle. Nous essayerons de montrer que l'étude des échanges thermiques, qui pouvait hier passer pour secondaire, est devenue aujourd'hui primordiale. Les utilisateurs de combustibles et, corrélativement, les constructeurs de fours ont été les premiers à ressentir cette nécessité et à entreprendre la mutation qu'elle suscitait.

Nous ne ferons intervenir les compositions chimiques et la structure des matériaux qu'indirectement. Nous distinguerons la terre cuite, la faïence et le grès, reprenant ainsi, au moins partiellement, la classification courante des produits céramiques. Au risque de trahir la véritable complexité des phénomènes de cuisson, nous n'étudierons, dans chacune des catégories précédentes, que l'influence de la température et du temps.

La technique de cuisson est principalement déterminée par le comportement du matériau céramique vis-à-vis du combustible utilisé. En effet, le mode d'enfournement ainsi que le type et la dimension des fours dépendent de la réaction du produit au contact des fumées, ou plus précisément de la composition de l'atmosphère engendrée.

Nous ne distinguerons schématiquement que deux techniques qu'il est convenu de qualifier, l'une de traditionnelle, l'autre de moderne. Pour chacune d'elles, nous énumérerons les combustibles mis en oeuvre ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Il en découlera la technique de cuisson adoptée ainsi que les types de fours utilisés.

Enfin, nous en tirerons les conséquences sur les plans thermique et économique.

1.2. TECHNIQUE TRADITIONNELLE

Elle se pratique depuis le début de l'industrialisation de la fabrication des produits céramiques, c'est-à-dire depuis le milieu du XIX^e siècle. C'est en effet à cette époque que sont apparus les fours intermittents "à flamme renversée" qui ont permis d'améliorer les échanges thermiques, et les fours continus "à feu mobile" qui ont apporté des perspectives de production massive. A cet égard, il est intéressant de préciser que le tirage inversé réalisait une économie de calories de 50 % par rapport au tirage direct en allongeant simplement le parcours des fumées le long de la charge. Le four à feu mobile représentait une économie supplémentaire de 65 à 70 % par rapport au tirage inversé, grâce à la combustion réalisée au sein même de la charge, à la récupération de la chaleur sensible des fumées et de celle des produits après cuisson, au cours de leur refroidissement (3).

1.21. Combustibles

Les principaux combustibles utilisés au cours de cette période ont été, dans l'ordre chronologique : le bois, le charbon et le fuel.

1.211. Le bois

Il a été très employé autrefois, et c'est bien souvent la proximité d'une forêt qui a suscité l'implantation d'une usine de céramique. Composé par moitié de carbone et par moitié d'oxygène et d'hydrogène, le bois a l'avantage de pouvoir distiller dans les foyers à la manière d'un gazogène et d'être exempt de soufre. Ses cendres, peu abondantes (0,5 à 2 %) sont toutefois calcaires et alcalines et par conséquent très fusibles.

Le bois a le pouvoir calorifique le plus faible des combustibles industriels : 4 500 Kcal/kg (pouvoir calorifique supérieur) à l'état sec. Mais il est particulièrement hygroscopique : il contient 50 % d'eau lorsqu'il est fraîchement coupé ; il faut donc ramené cette humidité à moins de 10 % par une dessiccation poussée si l'on veut atteindre une température de cuisson élevée. On lui fait généralement subir un séchage de plus de trois ans après coupe, sciage et refendage. Ce travail de préparation et le stockage nécessitent une dépense importante de main-d'œuvre et une forte immobilisation de capital. En raison de son prix de revient, le bois est pratiquement abandonné en France.

1.212. Le charbon

En général, on utilise des charbons gras, contenant une forte proportion de matières volatiles, dans le but d'allonger les flammes au maximum dans le four et d'obtenir ainsi une cuisson plus homogène. Ils se composent d'environ 30 % de carbone, les autres constituants principaux étant l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et les cendres. Son pouvoir calorifique supérieur est de 8 500 Kcal/kg. Son pouvoir cokéfiant doit être optimum afin qu'il ne s'agglomère pas sur les grilles ou qu'il ne freine pas l'accès de l'air de combustion.

Les cendres seront en proportion d'autant plus faible et leur point de fusion d'autant plus élevé que la cuisson sera réalisée à plus haute température.

Le charbon présente deux inconvénients majeurs : lorsque sa combustion est incomplète, il émet des suies et sa teneur en soufre peut atteindre 3,5 %.

Notons que le charbon peut être utilisé dans un gazogène pour produire un gaz de 1 200 à 1 500 Kcal par m³ (pouvoir calorifique supérieur) qui est brûlé dans le four de cuisson. Cette technique est en voie d'abandon en raison des lourdes charges d'exploitation qu'elle entraîne.

1.213. Les fuels

Issus de la distillation du pétrole brut, les fuels sont des mélanges d'hydrocarbures dont les principales caractéristiques permettent de les classer en quatre catégories, comme suit :

	Fuel domestique	Fuel léger	Fuel lourd	
			N° 1	N° 2
Rapport $\frac{C}{H}$ (g/g)	6.4	6.8	7.2	7.6
Viscosité cinématique (cst)				
. maximale à 20°C	9.5	4.9		
. maximale à 50°C			110	310
Densité moyenne à 15°C	0.840	0.900	0.940	0.980
Teneur en soufre maximale	0.5	1.8	1.8	3.5
Pouvoir calorifique supérieur (kcal/kg)	10.800	10.600	10.400	10.250

La température théorique de combustion est de 1 880°C.

Les fuels ont remplacé le bois et le charbon dans la plupart des fours industriels, en raison de leurs nombreux avantages. Ils permettent de réaliser une économie sensible de main d'œuvre sur la manutention des combustibles, la conduite du feu et le nettoyage des fours après cuisson. Ils présentent toutefois l'inconvénient d'une teneur en soufre non négligeable.

...

1.22. Action de certains composants des combustibles sur le matériau céramique

Les principaux inconvénients que nous avons mentionnés avec l'un ou l'autre des combustibles précédents sont les cendres, les suies et le soufre.

1.221. Cendres

Ce sont des oxydes métalliques (K_2O , Na_2O , CaO , MgO , MnO , Fe_2O_3).

Entraînées en très fines particules par les fumées, elles se déposent sur le matériau céramique en exerçant l'action de fondants et de colorants énergiques par combinaison avec la silice et l'alumine qui constituent la pâte et les émaux. Elles provoquent un émaillage ou un vernis le plus souvent indésirable en désorganisant la vitrification. A titre d'exemple, indiquons que chaque grain de chaux peut soit donner un silico-aluminate fusible, soit rester à l'état de CaO . Dans le premier cas, il forme une cavité par surfusion locale entre 1 150 et 1 300°C et colore le produit en blanc à température ambiante. Dans le second, il provoque un éclatement après cuisson dû à l'hydratation au contact de l'air atmosphérique.

L'oxyde de fer joue un rôle analogue, mais la teinte de ses composés est différente, virant du rouge au noir selon leur degré d'oxydation.

1.222. Suies

Ce sont des particules de carbone ou d'hydrocarbures résultant d'une combustion incomplète qui ont la particularité de rendre la flamme éclairante, ce qui peut présenter un intérêt sur le plan des échanges thermiques. Mais en se déposant sur le matériau céramique à basse température, elles constituent une résistance supplémentaire au flux thermique.

Si l'atmosphère du four est réductrice jusqu'à la fin de la cuisson, le carbone reste imbrûlé et les pièces plus ou moins noires.

Par contre, si elle devient oxydante, le carbone brûle et la chaleur dégagée par la réaction exothermique entraîne une surfusion locale. De plus, si la vitrification a commencé à rendre la pâte imperméable, les gaz provenant de la combustion créent des boursouflures.

1.223. Soufre

Cet élément existe essentiellement dans les charbons et les fuels. Il brûle en formant SO_2 dont une partie s'oxyde en SO_3 qui se transforme en $SO_4 H_2$ au contact de l'eau incluse dans le combustible ou dégagé par la combustion. L'acide sulfurique réagit à son tour sur les sels présents dans le matériau céramique. Certains de ces sulfates formés sont stables à la température de cuisson et colorent la céramique en blanc, d'autres sont instables à chaud et provoquent la formation de cloques de la même manière que les suies. L'action du soufre est préjudiciable à la plupart des émaux colorés.

1.23. Conséquences sur la technique de cuisson

Pour éviter l'action néfaste des cendres, des suies et du soufre, il est nécessaire, lorsque l'on souhaite obtenir des produits de première qualité, de les protéger pendant la cuisson du contact des fumées par un écran aussi étanche que possible. Il peut être constitué par des cazettes ou des mouffles, réalisant ainsi une cuisson dite "en atmosphère distincte".

1.231. Enfournement en cazettes

Les cazettes* constituent des enceintes en matière réfractaire dans lesquelles on dispose les pièces à cuire. Elles doivent posséder de nombreuses qualités qui sont souvent contradictoires, notamment :

- résister à froid aux chocs mécaniques auxquels elles sont inévitablement exposées lors des manutentions,
- résister aux chocs thermiques, dus aux variations de température parfois très brutales tant à l'échauffement qu'au refroidissement,
- résister à chaud aux charges considérables qu'elles supportent en raison de la hauteur des empilages,
- être aussi légères que possible pour faciliter les manipulations,
- présenter une bonne conductibilité thermique.

...

* Cazettes : étymologiquement "casettes" signifiant "petites cases".

Pour caractériser l'incidence de la cazerterie et du matériel d'enfournement sur la capacité utile de chargement, on définit les deux coefficients suivants :

- . le taux d'encastage : c'est le rapport de la charge utile à la charge totale enfournée (kg/kg),
- . la densité d'enfournement : c'est le rapport du poids de la charge utile au volume du four (kg/m^3).

A titre d'exemple, ces deux coefficients sont respectivement de l'ordre de $1/8$ et de 100 à 200 kg/m^3 dans le cas de la cuisson de porcelaine émaillée à 1400°C .

1.232. Enfournement en moufle

Un moufle est une enceinte réfractaire que l'on peut assimiler à une très grande cazette emplissant la totalité du four réalisant ainsi une construction à double enveloppe. Les produits sont chargés directement dans l'enceinte intérieure et les flammes circulent entre les deux parois.

Les moufles sont construits au moyen de panneaux minces pouvant être nervurés ou de briques alvéolées à grande surface rayonnante.

Indépendamment des limites d'ordre thermique et économique que nous examinerons dans les paragraphes suivants, cazettes et moufles présentent l'inconvénient de maintenir des produits dans l'atmosphère confinée dégagée par les distillations et calcinations qui se produisent en cours de cuisson.

1.24. Types de fours utilisés

Selon le mode de fonctionnement des fours, on distingue les fours intermittents et les fours continus.

1.241. Fours intermittents

Les cuissons y sont réalisées de manière discontinue. Les fours sont à "tirage direct" si les fumées s'échappent directement par les ouvertures pratiquées dans la voute (pl. 1 - fig. 1) et à "tirage indirect" ou "inversé" si les fumées sont évacuées par des carneaux ménagés dans la sole (pl. 1 - fig. 2). Ils affectent des formes circulaires ou parallélépipédiques et comportent ordinairement deux à dix foyers appelés "alandiers**".

1.242. Fours continus

La cuisson est effectuée en continu et la production est permanente. Ce principe suppose qu'il y a déplacement relatif des produits à cuire par rapport à la source de chaleur. Les fours continus se classent donc en deux catégories :

- . les fours à zone de feu mobile (et à charge fixe)

Qu'ils soient à chambres ou à galeries, leurs éléments communiquent entre eux et le feu se déplace de proche en proche par le jeu de registres judicieusement réglés (pl. 2 - fig. 1).

- . les fours à zone de feu fixe (et à charge mobile)

Les produits à cuire se déplacent dans des fours tunnels rectilignes ou circulaires (pl. 2 - fig. 2).

Les fours continus permettent de récupérer aisément la chaleur sensible des fumées pour préchauffer les produits froids et celle des produits cuits pour réchauffer l'air de combustion.

La technique de cuisson en cazettes ou en moufles ne permettant de réaliser des enfournements qu'avec un faible taux d'encastage, la taille des fours est grande pour qu'ils puissent assurer la production requise : les fours intermittents peuvent atteindre des capacités de 180 m^3 et les fours continus des largeurs de 3 m . Les fumisteries sont donc réalisées en matériaux peu onéreux, réfractaires certes, mais malheureusement peu calorifugés. Leur densité est couramment de 2.2 et leur conductivité moyenne à 500°C de $1 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$. C'est pourquoi les parois sont épaisses ($0,5$ à 1.0 m ou plus). On imagine alors quelles conséquences ces caractéristiques peuvent avoir sur les échanges et le bilan thermiques du four et sur ses conditions d'exploitation.

* Alandier : étymologiquement "andier" signifiant "gros chenet de fer".

1.25. Incidences thermiques

1.251. Echanges thermiques

Les pièces à chauffer reçoivent les calories nécessaires par conduction, convection et rayonnement dans des proportions qui dépendent notablement de la température.

- La conduction représente une part négligeable des échanges thermiques entre l'émetteur (four, cazette ou moufle) et le récepteur (cazette ou moufle céramique) en raison de la conductivité médiocre de ces matériaux et de la faible dimension des points de contact.

Par contre, elle joue un rôle important dans le cas d'empilages denses tels que carreaux ou briques dans le transfert de la chaleur de la périphérie vers le centre de l'empilage.

- La convection intervient de manière prépondérante à basse et moyenne températures dans les échanges entre les fumées et les cazettes ou les moufles. Il faut toutefois remarquer que les vitesses moyennes des fumées dans les empilages sont faibles, puisque dans les carreaux d'évacuation où elles sont manifestement les plus élevées, celles-ci n'excèdent pas 5 à 10 m/sec. Il est intéressant d'évaluer la densité de flux correspondante :

En admettant que la vitesse soit $V = 3.600$ m/heure, le diamètre équivalent du passage $D = 0,1$ m, la masse volumique des gaz $\rho_0 = 1,3$ kg/m³, la température $T = 1.000^\circ\text{C}$ et la viscosité absolue $\mu = 0,178$ kg/mh, le nombre de Reynolds serait :

$$R_e = \frac{VD}{\mu} \quad \rho_0 \frac{T_0}{T} = 565$$

Le régime d'écoulement est laminaire.

On verra plus loin (chapitre 4 - § 4.232), qu'il lui correspond un nombre de Nusselt déterminé par la relation :

$$Nu = 0,323 R_e^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}}$$

Le nombre de Prandtl P_r étant voisin de 0,78 on trouve :

$$Nu = 7$$

La densité de flux de chaleur échangée par convection est alors donnée par la formule :

$$q = h\Delta T$$

- h est le coefficient d'échange (kcal/m²h°C) qui est lié au nombre de Nusselt par la relation :

$$h = \frac{Nu \lambda}{L}$$

dans laquelle λ est la conductivité thermique du matériau (kcal/m h°C)

et L la longueur de la surface d'échange mesurée parallèlement à l'écoulement des gaz (m).

- T est l'écart de température entre les gaz et le matériau.

En prenant $\lambda = 1$ kcal/m h°C, $L = 0,1$ m et $T = 100^\circ\text{C}$, on trouve $h = 70$ kcal/m²h°C et $q = 7.000$ kcal/m²h

Comme on pouvait le prévoir, cette densité de flux est faible. Notons enfin qu'à l'intérieur des cazettes ou des moufles, la convection est strictement naturelle.

- Le rayonnement

Il joue un rôle capital à haute température. Toutefois, la présence d'un écran entre les murs du four et la charge réduit la valeur de la densité de flux de plus de moitié. En effet, si nous supposons, pour simplifier, que le facteur total d'émission des réfractaires soit égal à l'unité et que l'écran est une conductivité infinie, les équations du transfert par rayonnement s'écrivent (4) :

...

$$q = \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \sigma (T_2^4 - T_3^4)$$

dans lesquelles

q est la densité de flux en kcal/h x m²

σ est la constante de Stefan égale à

$$4.93 \times 10^{-8} \text{ kcal/h x m}^2 \times ^\circ\text{K}^4$$

T_1 est la température superficielle des parois du four en $^\circ\text{K}$,

T_2 est la température de l'écran en $^\circ\text{K}$,

T_3 est la température de la charge en $^\circ\text{K}$.

En éliminant la température de l'écran, on obtient :

$$q = \frac{\sigma}{2} (T_1^4 - T_3^4)$$

et non pas

$$q = \sigma (T_1^4 - T_3^4)$$

En prenant par exemple $T_1 = 1\ 000^\circ\text{C}$, $T_3 = 500^\circ\text{C}$, on trouve :

$$q = 4.93 \times 10^{-8} [1273^4 - 773^4] = 112.000 \text{ kcal/m}^2 \times \text{h}$$

Inversement, si l'on voulait obtenir avec un écran, le même échange thermique que celui obtenu sans écran, il faudrait que la température des parois du four T_0 soit telle que :

$$T_0^4 = 2 T_1^4 - T_3^4$$

au lieu de T_1 .

Si nous posons par exemple $T_1 = 1500^\circ\text{K}$ et $T_3 = 1000^\circ\text{K}$, on trouve $T_0 = 1738^\circ\text{K}$.

La température du four T_0 devrait être de 238°K supérieure à T_1 .

Il résulte de ces considérations que le coefficient de transmission globale et, par conséquent, les densités de flux correspondantes sont faibles. Il en est de même pour la période de refroidissement.

Il s'ensuit que le cycle de cuisson est nécessairement long, sous peine de provoquer des écarts de températures inadmissibles entre tous les points du four. Dans les fours intermittents, comme dans les fours tunnels, seule l'exécution d'un palier de température en fin de cuisson permet d'obtenir une isothermie suffisante.

C'est ainsi que le temps de cuisson d'un four à alandiers peut dépasser 100 heures.

1.252. Bilan thermique

Etablir le bilan thermique d'une cuisson céramique consiste à déterminer les valeurs suivantes :

. Qu : la chaleur utile comprenant :

Quv : la chaleur d'échauffement et de vaporisation de l'eau de façonnage,

Que : la chaleur d'échauffement de la céramique pouvant inclure l'énergie mise en jeu par les réactions physico-chimiques du matériau,

Qus : la chaleur d'échauffement des supports.

. Qf : les pertes par les fumées comprenant :

Qfs : la chaleur sensible des composants gazeux et solides,

Qfi : la chaleur de combustion des imbrûlés.

. Qp : les pertes par les parois comprenant

Qpe : la chaleur accumulée par échauffement

Qpd : la chaleur transférée par déperdition

...

2
• Q_c : la chaleur fournie par le combustible en supposant qu'elle est entièrement libérée.

On peut ainsi définir pour la cuisson :

$$r_b : \text{le rendement brut} : r_b = \frac{Q_u}{Q_c} = \frac{Q_{uv} + Q_{ue} + Q_{us}}{Q_c}$$

$$r_n : \text{le rendement net} : r_n = \frac{Q_{uv} + Q_{ue}}{Q_c}$$

La chaleur utile ne dépend en première approximation que de l'humidité du produit avant son enfournement et de son taux d'encastage dans le four. Si le premier facteur résulte uniquement des moyens de séchage disponibles, le second est imposé par la technique de cuisson en cazettes ou en moufles.

Les pertes par les fumées dépendent : de la température, du réglage de la combustion en excès ou en défaut d'air, de la quantité de combustible consommée et du temps. Elles augmentent donc avec la quantité de chaleur utile à fournir et la durée de la cuisson.

Les pertes par les parois sont d'autant plus importantes que la température est plus élevée et que les massifs réfractaires présentent une capacité, une conductivité et une surface plus grandes.

Dans le cas des fours intermittents elles sont également une fonction croissante du temps.

La chaleur théoriquement fournie par le combustible ne dépend que de son pouvoir calorifique et de la quantité consommée. Elle est évidemment égale à la somme des valeurs précédentes :

$$Q_c = Q_u + Q_f + Q_p$$

En définitive, la nécessité d'emploi de cazettes ou de moufles, la durée du cycle et la constitution du four sont autant de sujétions grevant le bilan thermique de la cuisson. Le rendement utile net reste faible.

1.26. Incidences économiques

1.261. Amortissements

Un four à faible densité d'enfournement (d) exigera, pour une production donnée (P) par cycle ou par unité de temps, un volume total important soit $\frac{P}{d}$ (m^3).

La construction d'un four de grande capacité est onéreuse et son exploitation exige une superficie importante pour permettre le stockage des produits fabriqués régulièrement pendant la durée de chaque cycle de cuisson. Ces investissements se répercutent sur le bilan annuel sous forme d'amortissement.

1.262. Frais fixes

Ils concernent la main d'oeuvre nécessaire :

- au chargement des produits dans les cazettes et leur déchargement, l'enfournement et le défournement des cazettes,
- à la conduite de la cuisson de jour et de nuit,
- à l'entretien du four, des moufles et du matériel d'enfournement, si l'on veut maintenir leur solidité et leur étanchéité.

1.263. Frais variables

Le rendement utile net d'une cuisson étant faible, la consommation de combustible est élevée. Même si celui-ci est peu onéreux, sa part dans le bilan est importante.

1.264. Second choix et rebuts

La qualité d'une pièce céramique après cuisson, dépend pour une grande part de la conformité de la température, du temps et de l'atmosphère au programme préétabli.

Elle se trouve donc liée à l'isothermie du four. Or celle-ci étant particulièrement difficile à réaliser aux différents stades du traitement, il en résulte un pourcentage non négligeable de pièces dites de "second choix" et de "rebut" dont l'incidence peut influencer considérablement la valeur marchande de la cuisson.

1.27. Conséquences générales

On comprend mieux les raisons pour lesquelles l'analyse des échanges thermiques au cours d'une cuisson céramique effectuée dans les conditions précédentes n'ait pas été entreprise de manière systématique. En effet, la nature des combustibles, la technique de cuisson, la technologie des fours, la rendaient particulièrement ardue et strictement spéculative.

Démarquées par ces trois limites, les possibilités ultimes du matériau céramique ne pouvaient être éprouvées (5) et plus d'un céramiste d'hier serait étonné d'apprendre les performances thermiques que l'on peut attendre aujourd'hui du matériau qui lui semblait pourtant si familier...

3. TECHNIQUE MODERNE

Elle a été progressivement introduite il y a quinze ans environ. Par rapport à la technique traditionnelle, elle apporte des modifications profondes dans la nature du combustible, la technique de cuisson et la technologie des fours.

1.31. Energie et combustibles

C'est la mise à profit par l'industrie de nouvelles sources d'énergie qui a provoqué cette mutation (6). Il faut citer l'utilisation pour la cuisson industrielle de l'électricité, du gaz manufacturé, du gaz naturel et des hydrocarbures liquéfiés.

1.311. Electricité

L'utilisation de l'énergie électrique peut évidemment être envisagée sous différentes formes, mais une seule d'entre elles est actuellement retenue : le chauffage par résistance (7). La tension d'utilisation est de 220 ou 380 volts alternatifs.

En raison des tarifs qui sont appliqués, cette énergie n'est utilisable que pour les cuissons continues ou les cuissons de nuit. Elle présente de plus l'inconvénient de ne pas permettre d'atteindre commodément des températures supérieures à 1300°C à cause de la tenue des résistances et de nécessiter de lourds investissements lorsque la puissance installée doit être accrue. Les applications sont donc limitées.

1.312. Gaz manufacturé

C'est du gaz d'éclairage, de l'air méthané, propane ou butané. Le pouvoir calorifique supérieur est compris entre 4000 et 5000 kcal/m³. La pression d'utilisation étant relativement basse (7.5 à 9.0 mbar), l'emploi d'un surpresseur est souvent rendu nécessaire pour alimenter les brûleurs.

1.313. Gaz naturels

Les gaz de St-Marcet, de Lacq et de Groningue sont composés pour plus de 80 % de méthane, les autres constituants étant le propane, le butane et l'azote. Leurs densités sont respectivement de 0.595, 0.580 et 0.640, leurs pouvoirs calorifiques supérieurs de 9.700, 9.850 et 8.400 kcal/m³. La température théorique de combustion dans l'air est de 1920°C. Les gaz naturels sont distribués à l'industrie sous forte pression (4 bar et plus) par des canalisations fixes.

1.314. Hydrocarbures liquéfiés

Le butane et le propane sont des produits obtenus lors de la distillation du pétrole brut ou lors du traitement du gaz naturel.

Ils sont distribués en vrac à l'industrie à la manière des combustibles liquides. Leur tension de vapeur est une fonction de la température. Le propane commercial, de loin le plus utilisé, a une tension de vapeur de 8.5 bar relatifs à 20°C et un pouvoir calorifique supérieur moyen de 11.900 kcal/kg.

En raison de sa masse spécifique en phase gazeuse de 1.85 kg/m³ c'est le gaz industriel au pouvoir calorifique supérieur le plus élevé : 22 000 kcal/m³. La température théorique de flamme dans l'air est de 1925°C.

1.32. Absence d'impuretés

Contrairement au bois, au charbon et au fuel, l'électricité et les gaz ne produisent ni cendres, ni suies, ni composés sulfurés. Cette remarque est évidente pour l'électricité. Elle le devient pour les gaz si l'on précise qu'il est particulièrement aisé d'effectuer la combustion complète d'un combustible gazeux (il faut un défaut d'air d'au moins 40 % pour obtenir la formation de carbone libre) et que les spécifications officielles limitent souvent la teneur en produits sulfurés (0.005 % pour le propane, soit une teneur 700 fois plus faible que celle du charbon ou du fuel lourd n° 2).

1.33. Conséquences sur la technique de cuisson

La compatibilité entre les produits de combustion et le matériau céramique permet de réaliser la cuisson en atmosphère commune : cazettes et mouffles sont supprimées ; seul subsiste le matériel d'enfournement (plaques, piliers, porte-pièces) permettant d'empiler les produits dans le four ou les séparant les uns des autres lorsqu'ils sont émaillés pour éviter le collage.

1.34. Types de fours utilisés

1.341. Fours intermittents

Si leur mode d'exploitation discontinu est resté le même (enfournement, cuisson, refroidissement, défournement), les fours intermittents sont tous des fours "cellules" à flamme renversée.

...

Dans les fours électriques, le chauffage est assuré par des résistances disposées sur les parois verticales.

Dans les fours à gaz, les brûleurs sont situés en deux rangées parallèles de chaque côté de la sole (pl. 3). Les produits de combustion cheminent le long des piédroits, sont rabattus par la voûte vers le bas, traversent la charge et sont évacués par des carneaux disposés sous la sole vers la cheminée placée à l'arrière et incorporée au four.

La cuisson à feu nu permet de modifier avantageusement de nombreuses caractéristiques.

	Technique	
	Traditionnelle	Moderne
Taux d'encastage* porcelaine émaillée (kg/kg)	1/5	1/3
Volume utile du four (m ³)	50 à 150	2 à 12
Densité des réfractaires	2.2	1.2 à 0.3
Conductivité des réfractaires à 500° C (kcal/m.h. ° C) ..	1.00	0.35 à 0.10
Epaisseur maximale des parois (m)	0.50 à 1.00	0.40

1.342. Fours continus

Les fours à zone de feu mobile sont abandonnés au profit des fours tunnels qui peuvent être classés de la manière suivante, selon le mode de transfert de la charge et par sections droites décroissantes:

- fours à wagonnets pour cuisson de décor de porcelaine à 850° (8), de poterie horticole à 980° C (9) ou de carreaux de terre cuite à 1050° C (10),
- fours à dalles glissantes à passage unique pour cuisson de poterie à 1000° C (11) de faïence sanitaire à 1200° C (12-13) et vaisselle de porcelaine à 1330° C (14) ou à passages multiples pour cuisson de vaisselle de faïence à 1050° C (15) et de carreaux de grès à 1280° C (16),
- fours à rouleaux pour cuisson de carreaux mosaïques à 1200° C (17-18) et de vaisselle de vitreous à 1150° C (19-20-21) ou à 1200° C (22-23),
- fours à chenilles pour la cuisson de porcelaine d'hôtel à 1170° C (24-25) ou cuisson de carreaux à 1050° C (26),
- fours à pas de pèlerin pour cuisson de carreaux de faïence (27),
- fours à tapis pour cuisson de carreaux à 950° C (28), 1100° C (29) ou 1170° C (30).

Ces fours sont tous de faible section, la cuisson s'effectuant unitairement (sauf dans le cas des fours à wagonnets et de certains fours à rouleaux) : les pièces sont exposées une à une à la source de chaleur (31).

1.35. Incidences thermiques

1.351. Echanges thermiques

- La conduction n'est pas sensiblement améliorée par la technique de cuisson à feu nu puisque la conductivité des matériaux et la dimension des points de contact sont naturellement les mêmes,

La cuisson unitaire de carreaux posés à plat sur leurs supports mérite toutefois une mention spéciale, puisque le transfert entre les supports et les carreaux est essentiellement thermo-conductif.

- La convection est par contre augmentée, puisque les fumées circulent au contact direct des produits à cuire à des vitesses plus élevées obtenues soit par l'utilisation de brûleurs "tunnels" à grande vitesse d'éjection permettant éventuellement la recirculation partielle des fumées par induction naturelle (32), soit par le réglage des brûleurs en fort excès d'air : cette disposition peut d'ailleurs être préjudiciable au rendement d'une installation intermittente. Enfin, il est possible d'adapter le profil de la chambre de chauffe à la forme et à la dimension des pièces, pour favoriser le contact entre les fumées et les produits à cuire.

C'est ainsi que l'on enregistre dans le premier cas des vitesses d'éjection de l'ordre de 125 m/sec. (33).

Ces artifices concourent tous à l'amélioration de l'isothermie par une meilleure circulation dans les angles du four, une diminution de la température des produits de combustion et la réduction des infiltrations d'air froid grâce à la légère surpression entretenue par ces brûleurs dans le laboratoire du four.

* Taux d'encastage : rapport de la charge utile à la charge totale enfournée (kg/kg).

11. Le rayonnement. Affranchi de la sujétion des cazettes et des moufles, on tire le meilleur profit du rayonnement en exposant la plus grande surface possible de la pièce aux brûleurs et aux réfractaires de l'enceinte.

Pour donner une idée de l'importance relative des deux derniers modes de transfert et de leur variation en fonction de la vitesse des fumées ou de la température du four, nous reproduisons dans les tableaux suivants, après conversion des unités anglo-saxonnes, les coefficients d'échange rapportés à l'écart de température linéaire et relevés dans un four tunnel de cuisson de faïence sanitaire (34). Nous avons calculé les densités de flux correspondantes.

Convection			
Vitesse des gaz (m/s)	Coefficient d'échange (kcal/m ² .h.°C)	Ecart de température (°C)	Densité de flux (kcal/m ² .h)
3,0	112	500	56.000
4,9	161	500	80.500
9,1	258	500	129.000

Rayonnement				
Températures		Coefficient d'échange (kcal/m ² .h.°C)	Ecart de température (°C)	Densité de flux (kcal/m ² .h.)
Réfractaire (°C)	Produit (°C)			
1 093	538	229	555	127 100
1 093	1 038	390	55	21 450
1 371	1 316	693	55	38 100

En résumé, le matériau à chauffer étant soumis au contact direct d'une atmosphère plus chaude qu'en cazettes ou en moufles et animée d'une plus grande vitesse, et étant exposé au rayonnement direct de brûleurs et de l'enceinte réfractaire, le coefficient de transmission global est plus élevé que dans la technique traditionnelle (§ 1.251). La densité de flux est supérieure et le temps nécessaire à la cuisson inférieur.

Remarque : Pour obtenir la même vitrification que par la méthode traditionnelle, on est tenu dans certains cas de pallier le manque de temps par un excès de température. Cet artifice est dit "chromothermique". A titre d'exemple, pour vitrifier correctement en 3 heures une faïence que l'on traitait autrefois en 40 heures, à 1 170°C, il est nécessaire de pousser sa température à 1 200°C (22).

On démontrerait de la même façon que le temps nécessaire au refroidissement est également inférieur. La cuisson à feu nu, et a fortiori la cuisson unitaire, permettent donc de réduire la durée des cycles. Nous avons figuré en annexe 1 le tableau comparatif des durées de cycles pratiqués selon l'une ou l'autre technique.

1.352. Bilan thermique

La chaleur utile est réduite dans le rapport des taux d'encastage. A noter que dans les fours continus à pas de pèlerin, ce taux atteint la valeur maximale de 1, la sole mobile permettant le transit des matériaux sans aucun rapport (27).

Les pertes par les fumées sont réduites dans le rapport des temps de cuisson, toutes les autres conditions étant égales par ailleurs.

Les pertes par les parois sont également minorées en raison des plus faibles capacité et conductivité thermiques des réfractaires utilisés et, pour les fours intermittents, des temps de cuisson plus courts. La quantité de chaleur emmagasinée est passée de 400 000 à 50 000 kcal par mètre carré (35).

La chaleur à fournir par le combustible ou l'électricité est donc également plus faible, d'autant plus qu'à l'inverse des combustibles solides ou liquides, aucun imbrûlé solide n'est à craindre, même sans excès d'air (31).

Le rendement utile net est par conséquent supérieur au rendement obtenu par la technique traditionnelle. Nous donnons en annexe 2 un exemple de rendements thermiques comparés dans le cas de la cuisson de porcelaine émaillée à 1 380°C et en annexe 3 le bilan thermique d'un four cellule de 2 m³ chauffé au gaz pour la cuisson de poterie émaillée à 965°C (36).

1.36. Incidences économiques

Comme au paragraphe 1.26, examinons l'incidence de la cuisson à feu nu et de la cuisson unitaire sur le bilan d'exploitation.

1.361. Amortissements

La construction d'un four intermittent moderne de faible volume est moins onéreuse que celle d'un four de grand volume et de production égale, bien que les réfractaires qui le composent soient de meilleure qualité (37). Et, bien-entendu, la superficie nécessaire à son implantation est considérablement plus faible. Dans le cas de petits fours continus à mécanisation poussée, les investissements et l'encombrement au sol peuvent être équivalents à ceux d'un grand four tunnel (38), mais d'autres arguments d'exploitation jouent nettement en leur faveur (39).

1.362. Frais fixes

Ils sont sensiblement abaissés. En effet :

- . le chargement et le déchargement des fours intermittents peuvent être partiellement mécanisés par l'emploi de soles mobiles (40) ou de chariots élévateurs ; l'enfournement et le défournement des fours continus peuvent être rendus entièrement automatiques (27).
- . la cuisson des fours intermittents s'effectue de jour, la main d'œuvre de nuit est supprimée ; en raison de leur faible inertie thermique, les fours continus peuvent être mis "en veilleuse" le week-end, voir même arrêtés (41), la remise en régime nécessitant de 15 minutes (24) à quelques heures (22). La conduite et la surveillance de tous ces fours sont grandement facilitées par les dispositifs de programmation, de régulation et de sécurité.
- . l'entretien se limite à celui des fours et des supports éventuels.

1.363. Frais variables

La consommation des fours intermittents est réduite dans le rapport de 10 à 4 (42), ce qui permet encore de réaliser sur ce seul poste une économie de 20 %, même dans le cas où le prix de la thermie du gaz ou de l'électricité est le double de celle de la thermie du charbon. Le rendement des petits fours continus est également supérieur à celui des grands fours tunnels (38).

1.364. Second choix et rebuts

En raison de la meilleure isothermie des fours le pourcentage des pièces de second choix et des rebuts est considérablement réduit, la cuisson étant commercialement valorisée comme l'indique le tableau comparatif ci-dessous dans le cas de la porcelaine de Limoges (43) d'où il apparaît que le gain est de 115 % soit 18 %.

630

	Premier choix	Deuxième choix	Rebut	Valeur totale
Valeur relative	9	5	2	-
Four à alandier chauffé au charbon de 92 m ³ (%)	40	50	10	630
Four cellule chauffé au gaz de 7 m ³ (%)	65	30	5	745

1.365. Productivité

La réduction des cycles de cuisson permet la fabrication entièrement à la chaîne, éliminant ainsi les goulots d'étranglement que constituaient les stockages de matériaux avant et après les fours. Elle permet également de réduire les délais de livraison et d'accéder ainsi à de nouveaux débouchés. L'utilisation d'énergies telles que l'électricité ou le gaz permet enfin de maintenir les ateliers dans un état de propreté ayant une incidence favorable sur le plan humain. Ces techniques modernes de cuisson qui entraînent une réduction et une simplification du processus de fabrication augmentent considérablement la productivité de l'entreprise.

1.37. Conséquences générales

Le céramiste se retrouve aujourd'hui face aux problèmes des échanges thermiques directs entre le four et le matériau, aux prises avec les difficultés de cuire plus vite et mieux. Il dispose pour cela d'énergies nobles, parfaitement connues et faciles à contrôler, de fours ayant bénéficié des progrès accomplis dans le domaine des réfractaires, de la mécanisation et des automatismes.

Ces fours - que l'on commence à appeler des "machines à cuire" (39) - permettent de réaliser dans les meilleures conditions la cuisson unitaire des produits céramiques.

Il devient alors indispensable de connaître les ultimes possibilités du matériau traité, et il est intéressant d'étudier leur rapport avec les échanges thermiques. Cette tendance est soulignée depuis quelques années et dans de nombreux pays par le dépôt de brevets et la construction de fours à passages expérimentaux. Nous avons relevé les principaux d'entre eux en annexe 4, par ordre chronologique (14-18-26 et 44 à 54).

Il est à remarquer que tous ces fours sont prévus pour explorer le domaine des cuissons très rapides, inférieures ou égales à une heure et que leur température de travail est de 1 300°C au maximum, à l'exception d'un seul d'entre eux qui peut atteindre 1 400°C. Le domaine des températures comprises entre 1 300 et 1 400°C a été peu étudié. C'est cependant celui de la cuisson de la porcelaine française. Il y a là incontestablement un domaine qu'il serait intéressant d'explorer.

4. CONCLUSION

Nous avons vu que la nature des combustibles primitivement utilisés (bois, charbon et fuel), et la susceptibilité du matériau céramique à certaines de leurs impuretés (cendres, suies et soufre) exigeait qu'un écran constitué par une cazette ou un moufle soit interposé entre les fumées et le produit à cuire. Cette sujétion conduisait à des fours de forte capacité et pesait lourdement sur les échanges et le bilan thermiques, imposait des cycles longs et des charges d'exploitation importantes.

La technique se prêtait mal à l'étude systématique des échanges thermiques, encore moins à celle des possibilités de cuisson rapide de la céramique.

L'apparition d'énergies et de combustibles modernes tels que l'électricité et les gaz manufacturés, naturels et liquéfiés rend possible, grâce à l'absence d'impuretés et à la facilité de mise en oeuvre, de traiter toutes les céramiques à feu nu.

Affranchi de la contrainte des cazettes et moufles, cette nouvelle technique permettait de réduire la dimension des fours à production égale et d'augmenter considérablement les échanges de chaleur.

Les cycles de cuisson se trouvent réduits et les bilans thermiques et économiques améliorés. Il est devenu primordial de connaître avec précision les possibilités du matériau pour concevoir les fours industriels à cuisson unitaire. Dans ce but, une série de fours expérimentaux ont été construits dans de nombreux pays.

Si certains essais ont été entrepris systématiquement, il ne semble pas que les résultats aient été reliés aux notions théoriques de la thermique. Nous envisageons de combler cette lacune, notre but essentiel étant l'étude des échanges thermiques en vue de la réduction des cycles de cuisson.

Nous pensons que nos travaux s'inscrivent logiquement dans le cadre de l'évolution des nouvelles techniques (54-55) - c'est le cas notamment des traitements en métallurgie (56-57) - qui s'orientent définitivement vers la chauffe unitaire, rapide et continue, et vers la mécanisation intégrale du processus thermique.

*

* *

CHAPITRE II

Généralités sur les produits céramiques

2. GENERALITES SUR LES PRODUITS CERAMIQUES

2.1. Définition

D'après R. Bessière (1) "la céramique est l'art de fabriquer des objets en portant la matière minérale - soit minérale, émaillée et brulée, objets façonnés généralement à l'état plus ou moins plastique et auxquels la cuisson vient donner les qualités définitives". Ses origines sont : la civilisation, la verrerie, la couleur, la translucidité le feu résistant, les résistances thermique, mécanique et électrique, les produits céramiques, utilisés depuis des temps très reculés - il existait déjà en Egypte et en Chine sur base préhistoriques (58) - occupent une place importante dans la vie moderne. Ses multiples utilisations en l'assurant les principales d'entre elles seront citées dans un essai de classification (§ 2.5).

Très schématiquement, le produit céramique peut être défini comme étant la nouvelle matière obtenue par l'action de la chaleur sur un mélange de trois groupes de composants différents :

- . des matières argileuses,
- . des matières dégraissantes,
- . des matières fusibles.

Chacun de ces groupes joue un rôle particulier et participe à l'élaboration d'un matériau de composition hétérogène, mais de structure cohérente. Ceux-ci méritent donc d'être étudiés séparément.

2.2. Structure de l'industrie céramique française

La Confédération des Industries Céramiques de France se compose d'une Fédération (Fabricants de Tuiles et Briques) et de onze Syndicats Nationaux Professionnels (produits réfractaires, faïences, porcelaines, etc.). Elle est complétée par la Société Française de Céramique et les Sociétés Professionnelles (Centre technique des Tuiles et Briques), dont la tâche essentielle est de promouvoir la recherche scientifique et le progrès technique dans les industries céramiques, et par l'Institut de Céramique Française, dont le but est la formation professionnelle des techniciens des établissements céramiques (59).

En 1964, l'industrie céramique comptait 2 213 établissements occupant 51 900 salariés dont 35 800 ouvriers, soit 90 % (60). Nous avons reporté en annexe 5 les principales données économiques correspondantes. Il ressort du tableau que l'industrie des tuiles et briques réalise à elle seule 10 % du chiffre d'affaires et que les produits réfractaires viennent en seconde place (16 %). Cette seule comparaison donne l'importance des équipements thermiques dans l'industrie.

2.3. Matières premières

2.3.1. Identification

Il y a trois manières d'identifier couramment les matières premières :

. Composition centésimale

On la détermine par analyse quantitative des corps simples ou composés suivant des méthodes chimiques ou physiques (spectrophotométrie d'absorption, de flamme, etc.) (61), et s'exprime généralement en pourcentages d'oxydes métalliques rapportés à la masse de l'échantillon. Nous avons donné en annexe 6 des compositions centésimales types de quelques produits céramiques courants. Cette évaluation globale ne tient donc pas compte de la répartition de l'oxygène entre les matériaux constitutifs ; elle permet néanmoins de prévoir certaines propriétés comme la couleur ou la tenue au feu.

. Formule moléculaire

Elle consiste à représenter les composants sous forme moléculaire. Ainsi la formule s'écrit $2 \text{SiO}_2 \cdot 3 \text{Al}_2\text{O}_3$. Plus précise que la composition centésimale, la formule moléculaire ne renseigne pas pour autant sur l'état futur de combinaison plus ou moins totale de la matière produite par la cuisson et peut fausser les conclusions que l'on serait tenté de tirer de la comparaison de deux formules moléculaires.

. Constitution minéralogique

L'utilisation des moyens physiques modernes d'investigation (microscope polarisant, spectrographie aux rayons X, analyse thermique pondérale et différentielle) a permis de connaître la véritable structure physique des arrangements de molécules et d'atomes constitutifs des minéraux utilisés. Ainsi, tous les silicates sont formés à partir d'un squelette de tétraèdres dont les quatre sommets sont occupés par des ions O^{2-} et le centre par un ion Si^{4+} (62). Ces tétraèdres sont reliés entre eux par des polyèdres de divers oxydes, mais les groupements $(\text{SiO}_4)^{4-}$ constituent la charpente des édifices et conditionnent leur classification (annexe 7 et planches 4 et 5).

Nous avons vu, d'après la définition qu'il intervenait trois groupes de composants différents. Nous allons les passer en revue dans ce qui suit :

2.32. Matières argileuses

. Origine

Elles résultent de la destruction (appelée kaolinisation) de roches éruptives telles que le granite. Elles sont donc associées par des mélanges de proportions variables de silice-aluminates hydratés et de roches diverses telles que micas et quartz. Lorsque les eaux en mouvement ont entraîné au loin les éléments du granite décomposé, il y a eu formation de bancs d'argile que l'on exploite actuellement en carrière. Si la roche mère est restée sur place, elle a formé du kaolin que l'on extrait par lavage (2).

. Classification

Les micralogistes américains classent les principales matières argileuses en 4 groupes fondamentaux sous-ensembles de la classification des silicates ; voir annexe 7 :

- le groupe sépiolitique : 5
- le groupe kaolinique : 6.1
- le groupe montmorillonitique : 6.2
- le groupe micacé : 6.2

. Impuretés des argiles

Les argiles contiennent pour la plupart des matières organiques qui leur donnent une couleur allant du gris au noir. Durant la cuisson, ces impuretés sont éliminées par combustion, ce qui nécessite certaines précautions.

Les argiles contiennent également des composés de divers métaux déterminant la couleur après cuisson selon la palette suivante :

- composés de fer et de titane : jaune à rouge
- composés du vanadium : jaune
- composés du cuivre : vert
- composés du cobalt : bleu
- composés du manganèse : violet

. Propriétés des argiles

Elles conditionnent dans une large mesure les opérations de préparation de la pâte, de façonnage, de séchage et de cuisson de l'objet céramique.

- action de l'eau : en présence d'eau, les particules argileuses se recouvrent d'une pellicule aqueuse, qui produit un fort gonflement et rend la pâte plastique. Cette plasticité peut être augmentée par deux autres artifices :

- . l'action alternée du gel et du dégel qui provoque un malaxage interne,
- . l'action de micro-organismes et de bactéries qui se développent au sein d'une argile reposant dans une cave humide et fraîche. C'est pourquoi, les utilisateurs stockent leur terre argileuse à l'extérieur pour la soumettre à "l'hivernage" puis dans une cave pour lui faire subir "le pourrissage" bien avant de la façonner.

Par délayage prononcé à l'eau, on peut transformer une pâte argileuse en suspension colloïdale qui est alors appelée "barbotine". La stabilité de la suspension est assurée par addition de réactifs alcalins - qui confère à la phase liquide un pH compris entre 9 et 10 - et par un brassage périodique.

En effet, par un phénomène de "thixotropie", les micelles argileuses d'une barbotine au repos tendent à se regrouper et à se solidifier apparemment. L'argile est utilisée sous forme de barbotine dans le procédé de coulage qui sera mentionné plus loin.

- action de la chaleur : sans anticiper sur le séchage et la cuisson qui seront traités ultérieurement et séparément, il paraît souhaitable de mentionner dès à présent que la chaleur produit sur les argiles trois effets distincts :

- . une contraction de volume appelée "retrait" et due à la déshydratation,
- . un durcissement général,
- . une coloration, fonction de la nature des oxydes contenus dans l'argile et de celle de l'atmosphère entretenue dans le four en cours de cuisson.

2.33. Matières dégraissantes

Ce sont des matières inertes qui ont pour but de diminuer la plasticité et d'augmenter la porosité de l'argile crue, de freiner le retrait en cours de cuisson et de constituer un lien entre matières

argileuses et fusibles en cours de vitrification. Les principales matières dégraissantes utilisées sont : le sable, les galets calcinés, les chamottes et les tessons.

• Sable

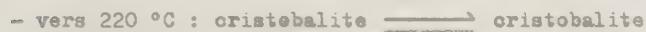
Le sable est la forme la plus courante de la silice SiO_2 , représentant la liaison la plus compacte des tétraèdres $(\text{SiO}_4)^{4-}$. Il provient du quartz. Sous l'action de la température, il subit des transformations cristallines réversibles (63) :

- à 573 °C : quartz α	$\rightleftharpoons$	quartz β
- à 867 °C : quartz β	$\rightleftharpoons$	tridymite
- à 1 470 °C : tridymite	$\rightleftharpoons$	cristobalite
- à 1 725 °C : cristobalite	$\rightleftharpoons$	verre de silice

Ces transformations sont extrêmement lentes, et toutes les formes de silice peuvent exister dans le produit fini à des températures situées hors des limites de stabilité. Les sables fins, courants sont utilisés dans l'industrie de la terre cuite, les sables les plus purs dans celle de la faïence et de la porcelaine.

• Galets calcinés

Les galets de mer, calcinés à haute température avant broyage, sont essentiellement composés de cristobalite qui, à basse température, subit également une réaction réversible :



Ajoutées à l'argile, les galets calcinés lui communiquent leur blancheur en cours de cuisson et sont utilisés dans la composition d'un grand nombre de faïences.

• Chamottes

Ce sont des argiles calcinées qui seront parfaitement aptes en cours de cuisson, si leur calcination a eu lieu à une température précisément supérieure à la température de cuisson. Contrairement au sable et aux galets calcinés, les chamottes présentent l'inconvénient de ne pas modifier sensiblement la composition chimique des pâtes auxquelles elles sont ajoutées. Elles sont souvent utilisées dans l'industrie du grès et dans celle des réfractaires.

• Tessons

Ce sont des chamottes obtenues non pas à partir d'argiles calcinées mais à partir de débris de pièces cuites et broyées.

Les matières dégraissantes ont un coefficient de dilatation qui dépend de leur composition et de la température comme figuré sur la planche 6. Cette propriété présente l'inconvénient de pouvoir aggraver le coefficient de dilatation du support céramique à celui de l'émul, afin de mieux assurer la liaison, en agissant sur sa concentration en matière dégraissante. Par contre, elle présente l'inconvénient de rendre certaines plages de température (200 à 250°C et 550 à 600°C) particulièrement dangereuses à franchir, en raison de la variation importante du coefficient de dilatation.

2.34. Matières fusibles (2)

Ces matières provoquent la formation d'une phase vitreuse dans la masse céramique sous l'action de la température. Elles opèrent, soit directement en fondant sans agir chimiquement sur le milieu céramique, soit indirectement en formant avec la silice ou les silicates des composés plus fusibles. Les principales matières fusibles utilisées sont des sels alcalins ou alcalino-terreux.

• Feldspaths et pegmatites

Les feldspaths les plus couramment employés sont l'orthose ($6 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Na}_2\text{O}$) et l'albite ($6 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{K}_2\text{O}$) qui se trouvent à l'état de mélange dans la nature. Ce sont des roches dures, qui se vitrifient à des températures variées, généralement supérieures à 1 100°C. Les limites de température entre lesquelles s'effectue la vitrification étant relativement éloignées, on peut utiliser les feldspaths dans la fabrication de céramiques cuisant à des températures différentes telles que les faïences, les grès et les porcelaines. Les feldspaths sont fréquemment sous forme de pegmatites mélangées à 25 ou 30 % de quartz.

Les pegmatites sont plus fusibles et, de ce fait, utilisées pour la fabrication de céramiques cuites à moins de 1 100°C.

• Néphélines syénites

Ce sont des roches composées d'un magma de néphéline ($9 \text{SiO}_2, 4 \text{Al}_2\text{O}_3, 2 \text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$), de feldspaths potassiques et sodiques et de quelques minéraux micacés et ferrugineux. Leur action fondante à haute

température permet également de les utiliser pour composer des pâtes de grès, de faïence ou même de porcelaine, sous réserve toutefois qu'elles soient suffisamment pures.

. Craie

Elle existe dans la nature sous forme de carbonate de calcium (CO_3Ca) associé parfois à un peu de silice, d'argiles ou de minéraux ferrugineux. À $1\,000^\circ\text{C}$, le carbonate est entièrement décomposé en chaux vive (CaO) qui réagit sur la silice et sur les silicates pour former des composés plus fusibles. La craie est donc un fondant énergétique, dont on a cité les inconvénients au § 2.21 de l'introduction. Comme la silice, elle permet, de plus, d'ajuster la dilation de la pâte à celle de l'émail (64).

. Dolomie

C'est un carbonate double de calcium et de magnésium (CO_3Ca , CO_3Mg), qui commence à se décomposer vers 650°C et dont la décomposition est achevée vers 900°C . Il agit comme la chaux, mais de manière encore plus énergétique.

. Talc ou stéatite

C'est un hydrosilicate de magnésium (4SiO_2 , 3MgO , H_2O) souvent associé à l'alumine, la silice, la chaux ou l'hématite. Le talc présente l'intérêt de conférer aux produits vitrifiés une meilleure tenue au choc thermique et une plus grande résistivité électrique. Il est, de ce fait, très employé dans la fabrication des porcelaines à feu et des porcelaines électriques.

. Oxydes de fer

Ils sont présents à l'état d'impuretés dans de nombreuses matières premières de la céramique et sont des fondants très énergiques. Ils ont également la propriété de colorer les produits, donnant des nuances comprises entre le vert, le rouge, le brun et le noir, selon leur concentration et la nature de l'atmosphère de cuisson.

Remarque : on constate après cette étude des différents composants de la matière première que la classification donnée a priori présente effectivement un caractère très schématique qu'il convenait de nuancer. Les argiles possèdent une certaine fusibilité. Elle est moindre que celle des fondants, certes, mais contribue néanmoins à la vitrification. Cette gradation se retrouvera lors de la classification des différents produits céramiques au § 2.5.

2.4. Fabrication

Les principales étapes de la fabrication des produits céramiques sont la préparation des pâtes et barbotines, le façonnage, le séchage et la cuisson.

2.41. Préparation des pâtes et barbotines.

Les matières premières sont stockées dans les silos ou sous des hangars avant d'être séchées naturellement ou artificiellement, pour ramener leur humidité à un taux permettant leur division.

. Division

Brise-mottes, concasseurs et broyeurs de différents types sont autant de dispositifs mécaniques puissants, destinés à donner aux matériaux une granulométrie sensiblement homogène. Dans le cas de la fabrication de céramiques fines, il est même nécessaire de pousser la division plus loin en élaborant une barbotine à l'aide de délayeurs-agitateurs.

. Tamisage

Des tamis à secousses ou des tamis vibrants permettent d'homogénéiser parfaitement pâtes et barbotines.

. Purification

Elle consiste surtout à éliminer certains composés indésirables, tels que les particules de fer. Les appareils utilisés dans ce but sont habituellement des déferreurs magnétiques.

. Dosages

Le dosage des différentes matières premières qui entrent dans la composition de la pâte céramique, s'effectue soit en poids, soit en volume. Dans les industries fortement mécanisées, les dosages s'effectuent en continu à l'aide de doseurs distributeurs automatiques.

Pour reconstituer une pâte à partir d'une barbotine, il est nécessaire d'éliminer une grande quantité d'eau. Le procédé le plus primitif consiste à laisser le mélange se décanter à l'air libre et l'eau s'évaporer naturellement. Il ne peut être utilisé que pour les productions artisanales et dans les pays chauds. Dans les autres cas, on effectue le raffermissement des barbotines par filtration discontinue à travers des filtres-presses, par filtration continue à travers des tambours filtrants, ou par vaporisation dans un courant d'air chaud et séparation dans un cyclone.

. Pourrissage des pâtes

Il convient d'augmenter la plasticité des pâtes avant façonnage par stockage dans une cave humide pendant deux à trois mois. Nous avons déjà mentionné l'influence d'une fermentation microbienne sur la plasticité de l'argile.

. Malaxage et désaéragé

Ces deux opérations s'effectuent dans des boudineuses-fileuses sous vide qui fournissent des pâtes désaérées. En effet, l'air inclus dans la pâte au cours des opérations précédentes doit être éliminé sous peine de provoquer des déformations ou des éclatements au moment du séchage ou de la cuisson des produits façonnés.

2.42. Façonnage

Les différents procédés de façonnage tirent parti soit de la plasticité des matières argileuses, soit de leur aptitude à former des suspensions aqueuses. Les principaux d'entre eux sont le :

. Tournage

C'est la forme la plus antique du façonnage céramique, puisqu'elle était connue des Egyptiens. Le principe du tour vertical est resté le même ; son entraînement a toutefois été mécanisé. Le tournage consiste à parachever le façonnage d'une ébauche préalablement tournée. Les pièces "uniques" sont le plus souvent obtenues par tournage.

. Calibrage

Il consiste à placer une "balle" de pâte sur ou dans un moule fixé sur un tour dont la forme donne une des faces de la pièce, l'autre étant donnée par un "calibre" animé d'un mouvement vertical. Les assiettes sont calibrées.

. Moulage

On comprime l'argile dans un moule qui lui donne sa forme. Les pièces de forme réfractaires sont habituellement moulées.

. Pressage

Il s'effectue par forte compression de la matière céramique crue dans des moules en acier. C'est ainsi que sont fabriquées les briques réfractaires.

. Filage

La pâte est introduite dans un cylindre et forcée, à l'aide d'une vis d'Archimède, à s'écouler à travers une filière. C'est un procédé continu utilisé pour la fabrication de tubes, de carreaux, de briques creuses, de hourdis, etc.

. Coulage

On verse une barbotine dans un moule en plâtre dont la forme intérieure est la forme extérieure de la pièce à reproduire. Le plâtre absorbe l'eau de la barbotine et une couche de pâte molle se dépose par filtration sur la surface interne du moule. Quand son épaisseur est suffisante on vide l'excédent de barbotine. Après un certain délai, la pâte est assez ferme et le retrait suffisant pour que l'on puisse démouler la pièce. Le moule, une fois séché, peut être réutilisé un certain nombre de fois. C'est par ce procédé de coulage que sont fabriqués les appareils sanitaires.

2.43. Séchage

Il a pour but l'élimination de la grande partie de l'eau qui a été additionnée à l'argile pour en permettre le façonnage. La teneur en eau est ainsi ramenée d'une valeur comprise entre 10 et 30 % à une valeur en général inférieure à 3 %. Le séchage confère à l'argile la cohésion exigée par les manutentions ultérieures et prépare le travail de l'ultime opération, la cuisson. En effet, un excès d'eau résiduelle dans la pâte serait éliminé avec brutalité dans le four et dégraderait irrémédiablement la pièce crue. L'étude du séchage des produits céramiques a été abordée antérieurement (65). Nous nous contenterons d'en rappeler les principaux résultats :

. Nature de l'humidité de l'argile

L'eau incluse dans l'argile se présente sous deux formes :

- l'eau libre ou eau colloïdale, dont l'élimination s'effectue à densité de débit constante et provoque un retrait,
- l'eau liée ou eau intersticielle, dont l'évacuation a lieu à densité de débit décroissante et n'entraîne aucune variation de volume apparent.

. Equilibre isotherme de sorption

A une température déterminée, l'équilibre de masse d'eau entre une matière hygroscopique et un fluide en contact avec elle ne peut exister que si l'humidité relative au produit et celle du fluide se correspondent suivant une fonction représentée par "l'isotherme de sorption".

. Evaporation superficielle

Elle répond à une loi d'échange de la forme :

$$G = \beta (X_s - X_a)$$

dans laquelle :

- G est la densité des débits (kg/m².s),
- β est le coefficient de transfert de matière (m/s),
- X est la concentration de vapeur d'eau à la surface d'échange (kg/m³),
- X_a^s est la concentration de vapeur d'eau au bord de la couche limite (kg/m³),

. Mouvement de l'humidité dans le matériau

Il est régit par une loi de comportement de la forme :

$$G = - c \frac{\delta X}{\delta l}$$

dans laquelle :

- G est la densité de débit de l'eau déplacée (kg/m².s),
- c est la conductivité hygroscopique (kg/m.s.%),
- δ X est la variation élémentaire de la teneur en humidité par rapport à 1 kg de matière sèche (kg/kg)
- δ l est la variation élémentaire de longueur suivant laquelle s'effectue le mouvement (m).

. Analogie entre échanges thermiques et échanges massiques

Elle se trouve résumée dans le tableau ci-dessous (66) :

Variables	Echanges thermiques		Echanges massiques
	Température T		Concentration X
Coefficients	Densité de flux q		Densité de débit G
	Conductivité λ		Conductivité c
	Convection h		Evaporation β
	Diffusivité a = $\frac{\lambda}{\rho c_p}$		Diffusivité D = $\frac{c}{\rho}$
Loi de comportement	$q = - \lambda \overrightarrow{\text{grad } T}$		$G = - c \overrightarrow{\text{grad } X}$
Equation fondamentale	$G \frac{\delta T}{\delta t} = \text{div } \lambda \overrightarrow{\text{grad } T}$		$\frac{\delta X}{\delta t} = \text{div } c \overrightarrow{\text{grad } X}$
Loi d'échange	$q = h (T_s - T_a)$		$G = \beta (X_s - X_a)$
Nombre commun	Reynolds $Re = \frac{uL}{\nu}$		
Nombres distincts	Nusselt $Nu = \frac{hL}{\lambda}$		Sherwood $Sh = \frac{\beta L}{D}$
	Prandlt $Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$		Schmidt $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$
Relations	Stanton $St = \frac{Nu}{Re Pr}$	Lewis $Le = \frac{Sc}{Pr} = \frac{a}{D}$	Stanton'St' = $\frac{Sh}{Re Sc}$

où, en plus des symboles déjà définis,

- C est la chaleur massique (kcal/kg °C),
- t est le temps (s),
- T_s est la température superficielle (°C),
- T_a est la température du fluide (°C),
- u est la vitesse du fluide (m/s),
- L est une longueur caractéristique (m),
- μ est la viscosité dynamique du fluide (poises),
- ν est la viscosité cinématique du fluide (stockes),
- ρ est la masse volumique.

. Règles de conduite du séchage

Il est recommandé de conduire l'opération de séchage selon le processus suivant (1) :

- chauffer d'abord les pièces pour diminuer la viscosité de l'eau, tout en évitant une évaporation sensible. L'air chaud du séchoir sera très humide,
- évaporer ensuite l'eau libre en ventilant le matériau avec de l'air humide pour limiter encore l'évaporation superficielle,
- éliminer enfin l'eau liée avec de l'air chaud et sec.

Le matériau ne court plus de risque, car il a subi son retrait intégral.

. Séchoirs industriels

On peut les classer suivant différents critères :

- la nature du cycle : séchoirs intermittents (ateliers, chambres ou armoires), séchoirs continus (tunnels),
- la nature des échanges thermiques : séchoirs à convection (naturelle ou forcée), séchoirs à rayonnement (infra-rouge), séchoirs à combustion.

2.44. Cuisson

. Bat

La cuisson est l'opération capitale de la fabrication des produits céramiques. Elle consiste à provoquer la transformation des minéraux entrant dans la composition de la pâte par réactions entre eux sous l'effet conjugué de la température, de la composition de l'atmosphère ambiante et du temps. Une durée de cuisson plus réduite nécessite une température plus élevée ou une atmosphère plus réductrice pour obtenir la même vitrification.

. Divers types de cuisson

De nombreux produits céramiques doivent subir plusieurs cuissons. Elles ont alors pour but respectivement :

- de donner à l'objet suffisamment de consistance pour être manipulé et émaillé. Exemple : cuisson de "dégourdi" de porcelaine ou de grès. On peut également porter le tesson, s'il reste poreux, au terme de sa vitrification. Exemple : cuisson de "biscuit" de faïence.
- de cuire l'émail céramique déposé sur la pièce dégourdie ou biscuitée. Exemple : cuisson "d'émail" de porcelaine, de grès ou de faïence.
- de cuire le décor céramique appliqué "sous émail" ou "sur émail". Exemple : cuisson "de décor" de porcelaine ou de grès.

. Analyse des phénomènes physiques et chimiques de la cuisson

Elle peut se résumer très succinctement comme suit :

- action de la température :
 - . 0 à 120° C : évaporation de l'eau libre et de l'eau liée en complément d'un séchage imparfait : retrait et durcissement.
 - . 0 à 900° C : élimination par combustion des matières organiques (67) : dégagement gazeux.
 - . 100 à 600° C : élimination de l'eau de constitution : nouveau retrait. Exemple :

$$2 \text{ SiO}_2, \text{ Al}_2 \text{ O}_3, 2 \text{ H}_2 \text{ O} \longrightarrow 2 \text{ SiO}_2, \text{ Al}_2 \text{ O}_3 + 2 \text{ H}_2 \text{ O} - Q \text{ cal.}$$

(kaolinite)
(méta kaolin)

...

CHAPITRE III

Four expérimental

3. FOUR EXPERIMENTAL

3.1. Rappel de l'objectif

Dans l'introduction à cette étude, nous avons précisé que son but était de déterminer les possibilités de cuisson rapide des principaux produits céramiques fabriqués industriellement par l'analyse des échanges thermiques correspondants. Il importe cependant de satisfaire aux critères d'une fabrication de ce genre, en particulier à la qualité des produits finis.

3.11. Choix des produits traités

Les perspectives de développement de la cuisson rapide et unitaire ne se justifient que dans le cas de produits fabriqués en grande série sur des chaînes entièrement mécanisées. Cette restriction exclut par conséquent la poterie "artistique" de terre cuite, de faïence ou de grès. Pour des raisons d'encombrement et d'approvisionnement nous avons également exclu les matériaux sanitaires et les tuyaux d'assainissement en grès et pour des raisons de diversité nous ne traiterons pas les réfractaires. Ces considérations nous ont donc amenés à centrer cette étude sur les matériaux suivants, en complément d'une étude entreprise en 1964 dans un four à passage expérimental (45) :

- . terre cuite : carreaux et briques,
- . faïence : assiettes,
- . grès cérame : carreaux.

Dans chacune de ces catégories, nous avons sélectionné les produits de composition et de dimensions les plus courantes.

3.12. Détermination des échanges thermiques

C'est là le but essentiel de notre étude. Nous souhaitons déterminer à chaque instant d'une cuisson rapide les principaux paramètres qui caractérisent les échanges thermiques et établir les parts respectives de la convection et du rayonnement, la conduction entre le four et le matériau étant supposée négligeable. Nous envisageons notamment de traduire en densités de flux maximales les limites jusqu'alors exprimées en vitesse de chauffage ou de refroidissement ou, plus généralement, en durée de cycle. Pour effectuer cette expérimentation, il faudra disposer d'un four et de l'appareillage métrologique nécessaire à l'évaluation de ces paramètres.

3.2. Cahier des charges

Le four doit satisfaire à des conditions d'exploitation, d'échanges thermiques et de composition d'atmosphère.

3.21. Conditions d'exploitation

. Dimensions des produits

Elles déterminent le volume du laboratoire. Dans l'énumération du § 3.11., ce sont les briques creuses standards de 11 cm x 16 cm x 33 cm qui sont de plus grand volume. Le four sera conçu à partir de ces dimensions maximales.

. Type de four

Pour entreprendre l'étude devant conduire au développement de fours à passage, on pouvait imaginer de construire un four expérimental du même type, mais de dimensions réduites par rapport à un four industriel. Si l'utilisation d'un tel four, il y a quelques années (45), conjointement aux essais proprement dits, a permis d'aborder les problèmes technologiques soulevés par la conception même du four, et en particulier, de sa sole mobile animée d'un mouvement à "pas de pèlerin", elle a toutefois mis en évidence les difficultés de son exploitation par les moyens traditionnels dont dispose un Centre d'Essais.

En effet, le four étant "continu", la surveillance doit être permanente, ce qui exige la mise sur pied de trois équipes se relayant nuit et jour.

De plus, l'analogie entre le four industriel et le four expérimental est faussée, car :

- les pièces à traiter ne peuvent être commodément fabriquées en modèle réduit,
- leurs dimensions - l'épaisseur notamment - conditionnent largement la durée du cycle de cuisson, il ne saurait donc être question de les modifier (72),

...

- le gradient longitudinal de température est d'autant plus élevé que la longueur du four est plus réduite. A titre d'exemple, l'écart de température longitudinal entre les deux bords d'une assiette de $\varnothing$ 25 cm était de 70° C à la température moyenne de 500° C dans le four expérimental de 9 m de long. Il n'aurait été, toutes choses égales par ailleurs, que de 21° C dans un four industriel de 30 m de long.

Enfin, il est difficile de faire varier à l'infini la forme de la courbe de cuisson. La zone de feu ne peut être facilement déplacée et la modification de l'équilibre d'une zone d'un four tunnel se répercute inéluctablement sur les autres zones.

C'est pour ces multiples raisons qu'il a été décidé de construire un four intermittent, susceptible de reconstituer les cycles d'un four continu. Le four est donc appelé "simulateur de four à passage". La température du produit traité y sera fonction du temps, comme dans un four continu. La durée des cycles envisagés étant relativement courte, l'exploitation du four s'avère possible pendant les heures normales de travail, plusieurs essais pouvant même être prévus dans la même journée.

Automaticité

La reproduction fidèle de courbes de cuisson préétablies ne peut commodément s'effectuer qu'à l'aide d'un appareil de régulation de température automatique commandé par programme. En effet, dans le fonctionnement d'un four intermittent, la température est -sauf exception- continuellement variable et il ne saurait être question, dans le cas de cycles rapides, de confier la conduite du four à un opérateur, même très expérimenté. De plus, si une certaine marge d'initiative est permise au moment de l'établissement du programme, il est nécessaire que les essais d'un même programme soient reproductifs, donc que le facteur humain soit éliminé.

Sécurité

Une "machine à chauffer" automatique doit nécessairement comporter des organes de sécurité, destinés à prévenir tout incident ou tout accident. Là encore, son fonctionnement dynamique ne permet plus d'en confier le contrôle à un opérateur. Toute anomalie doit se traduire automatiquement par une mise à l'arrêt du four.

3.22. Conditions d'échanges thermiques

Nous avons énuméré les conditions d'échanges thermiques et schématisé leur influence sur la conception du four dans un idéogramme en annexe 11.

Température de cuisson élevée

Les produits à traiter ayant été définis, les températures finales de cuisson sont déterminées. Elles sont comprises entre 1 000° C (terre cuite) et 1 300° C (grès), comme nous l'avons indiqué sur l'annexe 8. La connaissance de la température maximale de travail est fondamentale, puisque c'est elle qui conditionne la nature des matériaux réfractaires à mettre en oeuvre dans la construction du four : leur température limite d'utilisation doit lui être supérieure. La température maximale détermine aussi, dans une certaine mesure, la source d'énergie : le plafond de 1 300° C ne sera commodément atteint qu'avec un combustible liquide ou gazeux. Nous avons largement développé dans l'introduction les raisons qui militent en faveur des gaz. Parmi eux, nous avons choisi le propane qui, disponible sous pression élevée, est particulièrement aisé à utiliser pour alimenter les brûleurs.

La température maximale conditionne également la nature de l'ouvrage des brûleurs. Il ne saurait être question d'employer des brûleurs à tête métallique. Ils seront obligatoirement à ouvrages réfractaires.

Inertie réduite

La rapidité des cycles envisagés (annexe 4) impose que le four intermittent présente une très faible inertie au chauffage et au refroidissement, pour que la limite dans la réduction des cycles de cuisson soit atteinte d'abord par le matériau céramique et non par le four expérimental. Cette nécessité conditionne :

- la conductibilité, la densité et la résistance aux chocs thermiques des réfractaires utilisés pour sa construction. Les pertes par accumulation calorifique doivent être aussi réduites que possible. Les matériaux seront donc isolants et légers. Ils doivent, de plus, résister aux chocs thermiques : cette dernière propriété étant a priori contraire aux deux premières, il convient de trouver un compromis,
- le refroidissement de la fumisterie. Il sera réalisé par un circuit d'air froid, sans communication avec le laboratoire, destiné à évacuer rapidement pendant la période de refroidissement une partie de la chaleur accumulée par les réfractaires pendant la période d'échauffement.

...

• Convection forcée

Elle sera assurée par deux artifices :

- l'utilisation de brûleurs à grande vitesse d'éjection, dont les produits de combustion sont par conséquent dotés d'une quantité de mouvement élevée,
- la possibilité d'augmenter la masse de fluide en circulation autour du produit à cuire (73) par le soufflage d'air de dilution des fumées. Aux basses températures du cycle de cuisson, elle présente l'avantage certain d'augmenter les échanges de chaleur, sans risquer le choc thermique par impact de fumées très chaudes sur un produit encore cru. Il faut toutefois s'assurer de l'homogénéité du mélange.

L'équipement du four, en vue de créer une forte convection, présente une certaine originalité.

• Rayonnement intense

Le rayonnement dépend essentiellement de la température de l'enceinte, donc il sera favorisé par plusieurs facteurs :

- la disposition des brûleurs "en vue" du produit à traiter,
- le choix judicieux des réfractaires du revêtement intérieur. Leur facteur total d'émission à haute température sera aussi élevé que possible ; mais il ne faut pas oublier qu'il est fonction du rayonnement incident (74). Ce choix ne pourra s'effectuer en toute connaissance de cause que si les caractéristiques spectrales des réfractaires sont connues.

Rappelons enfin que la présence de gaz tels que CO_2 , H_2O et éventuellement CO et CH_4 contenue dans les fumées de propane contribuent aux échanges thermiques par leur spectre de bandes⁴ (75).

• Charge thermique volumique élevée

La charge thermique volumique est le rapport de la puissance calorifique du four en fonctionnement au volume de sa chambre de chauffe. Une étude du chauffage au gaz de métaux ferreux entre 950 et 1 200° C a montré que pour les charges thermiques inférieures à $10 \times 10^5 \text{ kcal/m}^3 \text{ h}$ le flux de chaleur cédé par le four à la charge est une fonction croissante de cette charge et que la densité de flux augmente bien moins vite qu'elle (76). Il est raisonnable de penser qu'il en est de même dans un four de cuisson céramique.

Actuellement, les charges thermiques des fours intermittents chauffés au gaz effectuant le cycle de 24 heures sont comprises entre 50 000 $\text{kcal/m}^3 \text{ h}$ pour la cuisson à 1000° C et 150 000 $\text{kcal/m}^3 \text{ h}$ pour la cuisson à 1 400° C. Si l'on envisage, par exemple, de réduire le cycle dans le rapport de 1 à 10, il faut augmenter la densité de flux dans le même rapport et, par conséquent, la charge thermique du four dans un rapport bien supérieur. Faute d'éléments plus précis, on peut envisager de la prendre comprise entre 10 et 20. Cette hypothèse permet une évaluation de la puissance totale des brûleurs, une fois connu le volume de la chambre de chauffe du four expérimental.

L'étude précédemment évoquée a mis en évidence que le rendement des fours considérés était approximativement une fonction hyperbolique décroissante du logarithme de la charge thermique. En raison du caractère expérimental de notre four, il importe peu d'évaluer son rendement, mais il convient de prévoir qu'il sera particulièrement faible.

3.23. Conditions relatives à la composition de l'atmosphère

Nous avons vu que la cuisson de la céramique nécessitait une atmosphère oxydante ou réductrice (§ 2.44.).

• Atmosphère oxydante

Elle sera obtenue de deux manières différentes :

- par réglage de la combustion en excès d'air aux brûleurs,
- par soufflage d'air pour diluer les fumées comme nous l'avons vu au paragraphe précédent.

A basse température, l'excès d'air doit pouvoir atteindre 500 % pour se mettre dans les conditions d'exploitation de certains four tunnels ; par contre, à haute température, un excès d'air de 10 à 20 % est habituellement suffisant.

• Atmosphère réductrice

Nécessaire à la fin de cuisson de certains produits céramiques, elle sera obtenue par réglage de la combustion en défaut d'air (5 % environ).

...

la relation qui relie arène et déficit d'air alimentant les brûleurs aux teneurs des fumées en CO_2 , CO et H_2 , et valable pour la combustion du propane, est illustrée par le diagramme représenté sur la planche 8. Les combustions complètes en excès d'air sont représentées par le segment AB, les combustions incomplètes en déficit d'air et sans oxygène libre par le segment AC (77). Ce diagramme est d'une grande utilité pour la conduite des fours, lorsque l'on dispose d'un appareil analyseur de prémélange air/gaz ou de produits de combustion.

3.3. Description du four expérimental

3.31. Conception générale

Le matériau réfractaire est disposé dans un laboratoire parallélépipédique, chauffé alternativement par deux ensembles de brûleurs situés dans ses faces opposées, perpendiculairement à son grand axe (pl. 9). Avant d'accéder au laboratoire, les produits de combustion peuvent être éventuellement dilués par de l'air débouchant sous un angle de 90° . Les fumées issues d'un côté traversent donc le laboratoire et sont évacuées de l'autre côté, à l'aplomb de la porte. La manœuvre de vannes et de registres disposés sur les conduits d'alimentation des brûleurs, de soufflage de l'air de dilution et d'évacuation des fumées, permet l'alimentation de la combustion. Le laboratoire est entouré de carreaux par lesquels il est possible de souffler de l'air pour les refroidir.

3.32. Laboratoire

Il est construit en briques réfractaires isolantes et alumineuses à l'exception de la voûte plate qui, pour des raisons de tenue mécanique, est composée d'une dalle en béton coulée sur place. Les murs sont composés de : une isolation thermique assurée par la lame d'air des carreaux de refroidissement (ventilateur arrêté) et par des produits réfractaires ou calorifuges. Nous avons figuré en annexe 12 les caractéristiques thermiques du laboratoire supposé en régime permanent, dans le cas d'une température de paroi imposée ($1400^\circ C$ sur les faces intérieures, 50 , 40 et $100^\circ C$ sur les faces extérieures de la sole, des murs latéraux et de la voûte). La conductivité des matériaux est donnée par les fabricants, celle de l'air est calculée par la formule de Nusselt (70):

$$Q = \frac{\frac{(T_1)^4}{(100)} - \frac{(T_2)^4}{(100)}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{C}} + \lambda' \frac{T_1 - T_2}{d} \quad \text{dans laquelle :}$$

T_1 , T_2 et T sont les températures absolues de la face la plus chaude, de la face la plus froide et la température moyenne ($^\circ K$),
 C_1 , C_2 et C les constantes de rayonnement du corps noir de la face la plus chaude et de la face la plus froide ($kcal/m^2 \cdot ^\circ K^4$);
 d est l'épaisseur de la lame d'air (m),
 λ' la conductivité de l'air, fonction de d et de T ($kcal/mh^\circ C$).

Les températures considérées étant inférieures à $1300^\circ C$, le premier terme est négligeable devant le second. La conductivité λ' à $T^\circ C$ est donnée à partir de la conductivité λ_0 à $20^\circ C$ par la formule de Knoiblauch :

$$\lambda' = \lambda_0 \frac{1 + \frac{125}{293}}{1 + \frac{125}{T}}$$

et λ_0 par un abaque (70) à partir de d .

Les courbes de température des quatre parois principales du laboratoire en régime permanent sont représentées sur la planche 10. L'aire du polygone délimité par les courbes et les axes donne la mesure de la quantité de chaleur emmagasinée par les réfractaires, lors de la mise en régime, sous réserve que la surface de chaque trapèze élémentaire soit pondérée par la densité et la chaleur spécifique du réfractaire ou de la couche d'air qu'il représente. Ce diagramme permet de s'assurer qu'aucun réfractaire n'est soumis à une température supérieure à sa limite d'utilisation. Les murs latéraux du laboratoire sont pourvus de 4 tubes destinés au passage des thermocouples et les portes de chargement d'un regard permettant d'examiner le comportement du matériau en cours de cuisson et d'effectuer éventuellement une mesure au pyromètre optique.

3.33. Brûleurs

Compte tenu des exigences du cahier des charges, il semblait intéressant d'équiper le four des nouveaux brûleurs U.R.G. type T2M7 à combustion chaudière et à grande vitesse d'éjection. Ces brûleurs réfractaires, sertis dans une chemise métallique (pl 11) sont montés sur deux éléments en acier inoxydable refroidis à l'eau ; l'ensemble de chauffe présente donc une faible inertie thermique (57).

...

Les caractéristiques principales de ces brûleurs sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Pression d'alimentation nominale	110 mbar
Débit de propane nominal	600 g/heure
Puissance thermique nominale	6 600 kcal/heure
Température des produits de combustion	1 520 °C
Vitesse des produits de combustion	117 m/sec

Le diagramme général de fonctionnement représenté sur la planche 12 rend compte des possibilités de ces brûleurs à tous les régimes. Au taux de mélange de 100 %, le débit d'allumage du brûleur est compris entre 100 et 280 g/h soit 1 100 et 3 100 kcal/h.

Le nombre de brûleurs de chaque élément de chauffe a été déterminé à partir des trois données complémentaires suivantes :

- . Charge thermique désirée $C = 1\,500\,000 \text{ kcal/m}^3 \times h$,
- . Volume de la chambre de chauffe $V = 0\,100 \text{ m}^3$,
- . Débit thermique unitaire des brûleurs en "veilleuse" $= 2\,750 \text{ kcal/h}$,

$$n = \frac{CV}{6\,600 + 2\,750} = \frac{1\,500\,000 \times 0.1}{9\,350} = 16$$

Les brûleurs sont disposés sur quatre niveaux superposés. Toutefois, l'un d'entre eux est remplacé par un regard permettant d'observer le laboratoire. Afin de réduire les pertes calorifiques par la chemise d'eau, et d'augmenter la température superficielle de la paroi, celle-ci a été revêtue d'un feutre réfractaire (température limite d'utilisation : 1 500° C - épaisseur 7 mm - densité : 0.385 kg/m³ - conductivité à 750° C : 0.10 kcal/mh° C).

3.4. Equipement

Il comprend l'alimentation du four, la programmation et la métrologie.

3.4.1. Alimentation

On distingue les circuits fluides (propane, air comprimé, mélange air-gaz, air soufflé, fumées) et les circuits électriques (télé-commande, sécurité). Ils sont schématisés sur la planche 13.

. Propane

Il arrive à l'installation sous 4 bar. Une vanne manuelle, un monodétendeur et une vanne électromagnétique de sécurité commandent l'alimentation du régulateur de proportion dont le rôle est d'assurer le débit de propane au débit d'air de manière à conserver un rapport constant entre les deux fluides pour des débits variables. Ce régulateur à action pneumatique, dont le schéma de fonctionnement est représenté sur la planche 14, compare à chaque instant le débit d'air et le débit de gaz par l'intermédiaire des pressions différentielles qu'ils provoquent entre l'amont et l'aval de diaphragmes calibrés. Ces pressions différentielles sont reportées sur un organe central appelé "balance", dont le déséquilibre éventuel commande par relais pneumatique la position d'une vanne située sur la conduite de gaz, en aval du diaphragme. Le rapport air-gaz peut être modifié par action manuelle sur la balance. L'ensemble du régulateur est figuré sur la planche 15. La mesure des pressions différentielles mentionnées précédemment et celle de la pression absolue permettent de calculer le débit des deux fluides à partir des courbes d'étalonnage des diaphragmes. La souplesse de débit de ce régulateur pour un écart de taux d'aération n'excédant pas 1 % est de l'ordre de 1 à 8.

. Air comprimé

L'air comprimé du réseau urbain alimente le régulateur de proportion par une vanne générale et une détente à deux étages dont on contrôle la pression intermédiaire.

. Mélange air-gaz

Le mélange air-gaz est élaboré très simplement dans un tube mélangeur à la sortie du régulateur de proportion. Son débit est réglé par une vanne motorisée commandée par le régulateur de température à programme (cf. § 3.42.).

...

Le fonctionnement des brûleurs ne doit en aucun cas être interrompu par action sur le mélange (il se produirait en effet un retour de flamme dans la canalisation) ; il est donc nécessaire de prévoir deux by-pass pour assurer un débit résiduel dans chacune des deux canalisations qui alimentent les éléments de chauffe lors de la fermeture de la vanne motorisée. La valeur du débit de veilleuse est ajustée à l'aide d'une vanne à main, dont le réglage doit être précis. Sur chaque dérivation de la conduite principale se trouve une autre vanne motorisée, dont les positions, alternativement ouvertes ou fermées, commandent l'orientation du mélange air-gaz tantôt vers un élément de chauffe, tantôt vers l'autre. Ce mélange est ensuite distribué aux brûleurs de chaque élément par un collecteur "bouclé", dont on contrôle la pression d'alimentation et par une série de vannes individuelles à fermeture manuelle rapide ("quart de tour").

Air soufflé

Il comporte deux circuits indépendants, l'un destiné à diluer les produits de combustion, l'autre à refroidir les réfractaires du laboratoire par circulation dans des carreaux situés dans la maçonnerie. Le premier est alimenté par un ventilateur centrifuge ($700 \text{ m}^3/\text{h} - 70 \text{ mbar}$) et comporte deux dérivation vers chacun des éléments de chauffe, dont le débit "tout ou rien" est contrôlé par un registre à commande pneumatique. Le débit "tout" de l'air est réglé par un clapet à vis micrométrique disposé sur l'ouïe d'admission du ventilateur.

Le deuxième circuit est alimenté par un ventilateur centrifuge ($460 \text{ m}^3/\text{h} - 100 \text{ mbar}$), contrôlé par une vanne mamelle et scindé en deux carreaux dans la maçonnerie.

Fumées

Elles sont évacuées alternativement d'un côté et de l'autre du laboratoire vers la hotte d'aspiration par l'intermédiaire de deux registres commandés par servo-moteurs électriques.

Eau

Elle est utilisée pour refroidir les éléments de chauffe. Le débit de chaque circuit est déterminé par une vanne à main disposée sur la conduite d'évacuation et sa température repérée par un thermomètre à dilatation de liquide.

Télécommande

Des circuits électriques de télécommande sont établis entre le programmeur et la vanne motorisée de réglage du débit air-gaz, entre l'inverseur, les vannes motorisées d'orientation de ce débit, les registres d'air de dilution des produits de combustion et les registres d'évacuation des fumées.

Sécurité

Différents dispositifs de sécurité sont prévus sur l'installation :

- la sécurité contre le manque d'air comprimé interdit l'admission de gaz au régulateur dans le cas d'une baisse de pression d'air. Cet incident est relevé par un pressostat et entraîne la fermeture de la vanne électromagnétique générale,
- la sécurité contre le manque d'eau agit également en coupure de l'alimentation en gaz dans le cas d'une baisse de pression repérée par un pressostat monté sur chaque circuit,
- la sécurité contre un échauffement anormal des éléments de chauffe est assurée par deux aquastats montés sur les conduites d'évacuation d'eau qui commandent également la fermeture de l'électrovanne générale,
- la sécurité contre le manque de gaz,
- la sécurité contre le retour de flamme est réalisée par le montage d'une membrane d'explosion sur chaque collecteur distribuant le mélange air-gaz aux brûleurs pour éviter que l'expansion des gaz lors d'un éventuel retour de flamme n'endommage l'installation.

3.42. Programmation

La programmation automatique de la cuisson comporte deux fonctions distinctes : la régulation de température et la distribution des circuits fluides (mélange air-gaz, air de dilution, fumées).

Régulation de température

Le régulateur est un galvanomètre à programme, qui compare à chaque instant la température indiquée par un thermocouple (logé dans le matériau à cuire ou situé à proximité), à une valeur théorique fixée par le programme. Pratiquement, cette opération revient à situer la position de l'aiguille d'un galvanomètre recevant le courant thermoélectrique par rapport à deux index d'écartement constant ; ceux-ci se déplacent devant le cadran de lecture, actionnés par une came représentant en coordonnées polaires la fonction température-temps préétablie. Selon la position relative de la température vraie par rapport aux deux index, la vanne motorisée de régulation reçoit l'ordre de se placer en position ouverte, entr'ouverte ou fermée correspondant, compte tenu du by-pass, aux régimes "tout", "peu" ou "veilleuse".

...

La position de la vanne de régulation est rappelée par voyants lumineux sur un tableau. Un commutateur manuel permet d'inverser les commandes et d'effectuer un refroidissement contrôlé une fois la température de cuisson atteinte et le débit de gaz interrompu. L'air continuant à alimenter les brûleurs refroidit la charge de manière progressive et programmée. Enfin, l'action automatique du programmeur peut être neutralisée et remplacée par une commande manuelle.

Les principales caractéristiques du régulateur sont les suivantes :

- échelles de température : 0 à 1 200° C et 0 à 1 600° C sur 190 mm,
- précision : 1 %,
- durées d'un tour du programme : 2 - 4 - 8 - 16 - 32 heures,
ou : 12 - 24 - 48 - 96 - 192 minutes.

• Inversion des circuits fluides

Le rôle de l'inverseur est d'orienter le mélange air-gaz, tantôt d'un côté du four, tantôt de l'autre, de distribuer l'air de dilution dans les mêmes conditions et de permettre l'évacuation des fumées par le côté opposé. La cadence de ces inversions de marche est affichée sur une minuterie, qui met en mouvement à intervalles réguliers la rotation par demi-tours d'un combinateur à cames. Chaque came commande la manoeuvre d'une vanne motorisée d'inversion, d'un registre d'air de dilution ou d'un registre de fumées.

L'angle de calage de chaque came sur l'arbre commun et la plage utile de manoeuvre sont réglables. La position de tous les organes asservis est signalée par voyants lumineux placés sur le tableau de contrôle. L'action du distributeur peut également être annulée et remplacée par une commande manuelle.

Les principales caractéristiques du régulateur sont les suivantes :

- cycle de la minuterie : réglable en 6 plages de 0 - 4 sec à 0 - 40 heures,
- vitesse de rotation du combinateur : $\frac{1}{2}$ tour en 30 sec,
- temps de manoeuvre des électrovannes : 15 sec,
- temps de manoeuvre des registres d'air : 1 sec,
- temps de manoeuvre des registres de fumées : 15 sec.

Un diagramme séquentiel du déroulement des opérations est représenté sur la planche 16.

3.43 Métrologie

Les principales grandeurs intéressantes à connaître pour l'expérimentation sont des températures, des débits, des taux d'aération du mélange air-gaz et la composition de l'atmosphère du four.

• Repérage des températures

Il s'applique essentiellement aux corps à chauffer, aux fluides circulant dans le four et aux parois du laboratoire. Lorsqu'il s'agit du repérage de températures de masses solides ou fluides, la méthode adoptée est thermo-électrique ; dans le cas du repérage de températures de surface, on utilise la pyrométrie optique.

- Repérage par thermocouples : la nature des thermoéléments est déterminée par la température maximale à repérer : si elle n'excède pas 1 200° C, les thermocouples seront en nickel chrome-nickel allié, sinon ils seront en platine-platine rhodié. Leurs pouvoirs thermoélectriques à 1 000° C sont respectivement de 39.5 et 11.4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Comme les régimes pratiqués sont variables, il est commode d'enregistrer les températures. On utilise à cet effet un pont de mesure automatique basé sur le principe d'une compensation automatique de la tension inconnue au moyen d'un servo-mécanisme. Dans le circuit compensateur, on insère une résistance qui varie avec la température, de sorte que ces mesures peuvent être effectuées avec compensation automatique de la soudure froide. Les principales caractéristiques de l'appareil sont les suivantes :

- Echelles de température : 0 à 1 200° C et 0 à 1 650° C sur 210 mm,
- Précision : 0.5 % de la longueur de l'échelle,
- Nombre de points de mesure : 12,
- Vitesses de déroulement du papier : 20-60-120-240-720-1 440 mm/h.
- Repérage par pyromètre optique : on utilise un pyromètre monochromatique à disparition de filament. Il n'est évidemment pas possible d'enregistrer la température.

...

Mesure des débits

Les débits de propane et d'air de combustion sont mesurés à l'aide des diaphragmes et manomètres à eau incorporés au régulateur de proportion (cf § 3.41). La précision de ces appareils est suffisante pour les besoins de l'expérimentation. Le débit de l'air de dilution est calculé par mesure de la vitesse au tube de Pitot dans la conduite principale avant les deux dérivation et évaluation de la section intérieure. Là encore, la précision est suffisante.

Mesure des taux d'aération du mélange air-gaz

L'analyse est basée sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement infra-rouge par les hydrocarbures contenus dans le mélange. L'appareil utilisé a une précision de 1 % sur l'étendue de mesure de 0 à 10 % et son temps de réponse est inférieur à 3 sec.

Analyse des atmosphères du four

La teneur en CO_2 d'une part, en $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2$ + imbrûlés d'autre part, peut être enregistrée à l'aide d'un appareil du type d'Orsat, mais à fonctionnement automatique. Les principales caractéristiques de l'appareil sont les suivantes :

- échelle de concentration : 0 à 20 % sur 70 mm,
- précision : ± 0.5 %,
- vitesse de déroulement du papier : 20 mm/h,
- fréquence des analyses : 30 par heure.

La teneur en CO_2 et en O_2 peut être mesurée en utilisant des appareils rudimentaires, mais commodes, à absorption sélective par réactifs chimiques. Directement gradués en %, ils donnent une valeur approchée à ± 0.5 %.

Enfin, la teneur en O_2 peut être mesurée à l'aide d'un appareil plus précis, basé sur la susceptibilité magnétique de ce gaz. Pour une gamme de 0 à 100 % d'oxygène, la précision est de ± 0.1 % sur la concentration.

Toutes les valeurs obtenues par les trois méthodes peuvent être confrontées par l'intermédiaire du diagramme de combustion (pl 8).

3.5 Essais préliminaires

Ils doivent permettre d'effectuer le réglage des différents appareils et de juger des qualités d'isothermie du four.

Les réglages ont porté principalement sur la pression des fluides, la position intermédiaire de la vanne motorisée de régulation, les pressions et températures de déclenchement des pressostats et aquastats de sécurité, le calage des cames de l'inverseur.

Pour avoir une estimation de la distribution possible des températures à l'intérieur d'un échantillon de grande dimension, nous avons procédé au chauffage d'une brique creuse de 15 x 20 x 40 cm³ dans les conditions arbitraires suivantes :

- . température de cuisson 1 080° C
- . période d'inversion du chauffage 30 sec.
- . temps de chauffage 1 h 50 sec.
- . temps de refroidissement 1 h 25 sec.
- . durée du cycle total 3 h 15 sec.

La position des thermocouples et l'évolution des températures dans le temps sont représentées sur la planche 17. En fin de cuisson, les écarts et gradients de température s'établissent ainsi :

- . suivant l'axe Ox (40 cm) : 30° C soit 0.75° C/cm,
- . suivant l'axe Oy (20 cm) : 35° C soit 1.75° C/cm,
- . suivant l'axe Oz (15 cm) : 30° C soit 2.00° C/cm.

Deux remarques s'imposent :

- . Les écarts de température sont du même ordre de grandeur que ceux qui peuvent se produire industriellement,
- . toutefois, les performances du four sont meilleures longitudinalement que transversalement.

Ces écarts devraient pouvoir être minorés par une disposition du matériau mieux adaptée à l'éventuelle dissymétrie du laboratoire. Cette possibilité ne doit pas être négligée, lors de l'expérimentation ultérieure. Le four et une partie de son équipement sont représentés en photographie sur la planche 8.

CHAPITRE IV

Considérations théoriques

Après avoir exposé :

- les généralités sur les produits céramiques,
- la description du four expérimental et de son équipement,

nous allons présenter l'expérimentation proprement dite. Il est toutefois nécessaire de définir préalablement la méthode d'essais. Elle doit être choisie de manière à permettre une conduite facile du four, une expression analytique simple des transferts de chaleur et une représentation graphique commode des échanges thermiques.

4.1. Définition de la méthode d'essais

Les conditions d'une cuisson céramique sont caractérisées par les courbes d'évolution de la température et de la composition de l'atmosphère en fonction du temps. La première de ces courbes, appelée courbe de cuisson, est de loin la plus importante, puisqu'elle sert de base au calcul des échanges thermiques. L'incidence de la composition de l'atmosphère sur ces échanges est imperceptible en convection et faible en rayonnement (cf. §§ 4.212. et 4.233.). C'est pourquoi la construction de la courbe $T(t)$ correspondant au cycle le plus court est, avec la détermination des échanges thermiques correspondants, l'objectif principal de l'expérimentation.

4.11. Profil de la courbe de cuisson

L'équipement de programmation, dont est pourvu le four expérimental (la description en a été donnée au § 3.42. du troisième chapitre) accorde la plus grande liberté dans le tracé de la courbe $T(t)$, puisqu'il suffit de la reporter en coordonnées polaires sur la came du régulateur à programme pour en obtenir l'exécution précise. Si le thermocouple pilote est judicieusement noyé dans le matériau céramique à cuire, le jeu automatique des vannes de régulation et d'inversion placées sur le circuit d'alimentation des brûleurs permet de suivre fidèlement la courbe de cuisson que l'on désire étudier.

Avec un tel équipement, toutes les courbes de cuisson peuvent être en principe imaginées et suivies. Il paraît toutefois souhaitable de limiter les investigations à des courbes de cuisson composées d'autant de segments de droite qu'il est prévu d'allures de chauffe en cours de traitement. Ces profils correspondants à des croissances linéaires de la température en fonction du temps ont l'avantage de provoquer une densité de flux de chaleur transférée, constante pour chaque coefficient directeur des droites composant la courbe de cuisson. Ces coefficients correspondent à des vitesses de chauffage ou de refroidissement ; il sera alors possible de donner une solution analytique à la diffusion de la chaleur dans le matériau, si sa forme géométrique est simple, et une représentation graphique aisée des échanges thermiques à chaque instant.

4.12. Remarques préliminaires

En classant les matières premières qui entrent dans la composition céramique et en analysant les phénomènes physiques et chimiques que provoque la cuisson, on a vu que certaines plages de température étaient dangereuses à franchir pour le matériau qui risque de se casser sous l'effet d'un chauffage ou d'un refroidissement trop rapide.

Pour des raisons de simplification évidentes, on supposera que, si plusieurs zones dangereuses existent dans la même partie de la courbe - chauffage ou refroidissement - elles peuvent être franchies à la même vitesse limite V_c que l'on appellera vitesse critique. Cette hypothèse, qui restreint arbitrairement les possibilités ultimes d'accélération des cycles, présente toutefois l'intérêt de réduire sensiblement le nombre d'essais nécessaires à la détermination du cycle minimal, puisqu'elle réduit le nombre de plages de température à étudier.

4.13. Mode opératoire

Pour éliminer tout incident susceptible de provenir d'un séchage insuffisant, les produits crus ou émaillés seront séchés avant cuisson pendant 24 heures dans une étuve électrique réglée à une température supérieure à 120° C. Seuls des échantillons parfaitement secs seront expérimentés (taux de siccité $>99,5\%$).

4.131. Courbe de chauffage

On connaît le temps et la température de cuisson appliqués dans les techniques conventionnelles. Dans l'introduction, on a évoqué l'effet "chronothermique" en énonçant les incidences thermiques de la cuisson rapide (page 8). Il est donc souhaitable d'obtenir au préalable une première approximation du temps de cuisson, pour déterminer la température de cuisson optimale dans les conditions d'essais. C'est pourquoi on procèdera dans l'ordre suivant :

- Détermination de la vitesse critique de chauffage V_c entre la température initiale T_0 et la température de cuisson conventionnelle T'_c . Dans un premier temps, on effectue une cuisson à l'allure linéaire la plus rapide permise par le four. Si le résultat n'est pas satisfaisant, on réduit cette allure progressivement. La pente du segment de droite $T(t)$ convenable représente la vitesse maximale V_c de franchissement des zones critiques en cours de chauffage, et sa projection sur l'axe des temps une première approximation du temps de montée en température.
- Détermination de la température de cuisson T_c : on recherche cette température en prolongeant la cuisson à partir du segment de droite précédemment obtenu, de T_0 à T'_c .
- Détermination des vitesses de chauffage V_0 de T_0 à T_1 , V_1 de T_1 à T_2 etc : on fractionne l'intervalle (T_0, T'_c) en intervalles (T_0, T_1) , (T_1, T_2) ... imposés par les difficultés de parcours. On détermine pour chacun d'eux la vitesse admissible en appliquant aux intervalles suivants la vitesse critique V_c (pl 19 fig 1 à 3)

Remarque :

On peut être amené, dans certaines conditions, à effectuer un palier ou un pseudo-palier de température. Cela revient à insérer dans le programme une vitesse nulle ou très faible. Les paramètres à déterminer sont alors le niveau optimal de température et la durée de ce palier ou ce pseudo-palier.

4.132. Courbe de refroidissement

On procède de la même manière que précédemment en déterminant successivement :

- la vitesse critique de refroidissement V'_c permettant de franchir les zones dangereuses sans casser le matériau,
- les vitesses V'_0 de T_c à T'_1 , V'_1 de T'_1 à T'_2 etc... (pl 19 fig 4 à 6).

La température de défournement est comprise, par convention, entre 100 et 150° C. pour tous les essais.

4.133. Courbe résultante de cuisson

Le profil de cette courbe représente le cycle minimal de cuisson. Il se compose d'une succession de segments de droites, de pentes :

$$V_0, V_1, V_c, V_2 \dots V'_0, V'_1, V'_c, V'_2$$

4.14. Principaux défauts de cuisson et critères de qualité

On a répertorié en annexe 13 les principaux défauts de cuisson qui peuvent se produire, en indiquant leur origine la plus fréquente. Ce tableau doit se rapprocher de l'analyse des phénomènes physiques et chimiques de la cuisson.

En conséquence, plusieurs examens permettent de juger de la qualité des pièces traitées et d'orienter les essais dans le sens souhaité :

- la forme et la dimension après cuisson,
- la couleur de la surface extérieure et du tesson,
- l'état de la surface extérieure et le grain du tesson,
- la porosité et l'aptitude à l'émaillage.

4.2. Considérations théoriques sur les échanges thermiques en cours d'expérimentation

Comme dans beaucoup d'autres cas, l'étude théorique des échanges thermiques ne peut s'entreprendre qu'après un certain nombre de simplifications concernant le matériau traité, la convection et le rayonnement.

4.21. Hypothèses simplificatrices

4.211. Matériau traité

- Caractéristiques physiques (annexe 23) :

- . dimensions : elles sont supposées constantes. En effet, elles varient peu avec la température. Les courbes dilatation-retrait d'une éprouvette crue de 32,5 mm de longueur découpée dans les échantillons et montées sur un dilatomètre à enregistrement Chenevard (pl 20 et 21, fig 1) le démontrent. Les variations de longueur sont de l'ordre de 1 % entre 0 et 900°C,
- . conductivité thermique λ : sa variation en fonction de l'humidité d'un échantillon cru a été étudiée (78), de même que sa variation en fonction de la température pour la plupart des matériaux réfractaires industriels (annexes 9 et 10). Toutefois, l'étude de la variation de la conductivité d'un échantillon cru en cours de cuisson n'a - semble-t-il - jamais été abordée. Les mesures de la diffusivité thermique, de la chaleur massique et de la masse volumique apparente du matériau cru, à température ambiante, permettront de déterminer sa conductivité à cette température ; connaissant par ailleurs la conductivité du matériau vitrifié, on supposera linéaire la variation de conductivité de l'échantillon en fonction de la température,
- . chaleur massique c : on a vu qu'en cours de cuisson s'effectue au sein du matériau céramique une série de réactions chimiques ou physiques à caractère exo ou endothermique (combustion des matières organiques, transformations cristallines de la silice, décarbonatation, vitrification etc...). Pendant ces réactions, le matériau présente une chaleur massique apparente différente de la chaleur massique qu'il aurait, s'il était chimiquement ou physiquement inerte. A titre d'exemple, une argile blanche a une chaleur massique de 0,25 et 0,30 kcal/kg °C aux températures de 100 et 900° C, mais de 6,1 kcal/kg °C à la température de 565° C correspondant sensiblement à la transformation cristalline du quartz α en quartz β (79). Ces anomalies sont révélées par l'analyse thermique différentielle qui consiste à enregistrer, à chaque instant, l'écart de température entre le coeur d'une éprouvette échantillon et le coeur d'une éprouvette témoin de kaolin épuré préalablement calciné, utilisée comme corps neutre de référence. Ces deux éprouvettes sont placées dans un four et chauffées à la vitesse de 200° C/heure (pl 20 et 21, fig 2). On se gardera donc d'établir un bilan thermique dans ces zones à fortes variations de chaleur massique apparente et l'on supposera la chaleur massique constante et égale à sa valeur, à la température ambiante en dehors de ces zones (annexe 14),
- . masse volumique apparente ρ : définie par le rapport de la masse du produit sec à son volume apparent (pores ouverts et fermés compris), elle est déterminée à la balance hydrostatique suivant les prescriptions de la norme AFNOR B49-104-1940 sur une éprouvette découpée dans le produit. En raison du caractère hydrophile de l'échantillon, l'eau est remplacée par du pétrole.

On supposera la masse volumique apparente indépendante de la température. La perte au feu révélée par l'analyse chimique et les variations de dimensions n'entraînent pas d'erreur supérieure à 10 %.

La mesure de cette masse volumique apparente permet également de déterminer la porosité ouverte de l'échantillon définie comme le rapport du volume des pores ouverts, au volume apparent du corps.

- température :

- . distribution : on supposera que la température de surface de l'échantillon est uniforme, autrement dit que le flux thermique est unidirectionnel et transversal. On suppose également que c'est la température de surface qui subit la loi linéaire d'échauffement et non la température du coeur où le thermocouple pilote est placé pour des raisons de commodité. On obtient néanmoins une bonne approximation de l'écart de température qui existe en fin de chauffage entre la peau et le coeur de l'échantillon. Rappelons qu'imposer une température de surface revient à supposer infini le coefficient d'échange entre la source et le système,

...

- température moyenne : pour l'établissement du bilan thermique on supposera la température de l'échantillon uniformément égale à la température du cœur. Cette hypothèse serait évidemment hasardeuse, si l'épaisseur du matériau était grande, en raison même d'une faible diffusivité et des réactions chimiques et physiques précédemment évoquées (80).

4.212. Convection

- Caractéristiques physiques du fluide :

Les produits de la combustion du propane, mélangés ou non à de l'air de dilution, sont supposés présenter les mêmes caractéristiques de chaleur massique c' , de masse spécifique ρ' , de viscosité absolue μ' et de conductivité thermique λ' que l'air pur. Les variations de ces quatre paramètres en fonction de la température de mélange supposée uniforme dans le four sont représentées sur la planche 22, où l'on a également fait figurer les variations (faibles) du nombre de Prandtl (81).

- Vitesse de débit :

La vitesse de circulation du fluide dans le four autour de l'échantillon est supposée homogène. Les nombres de Reynolds sont, en effet, relativement élevés puisque compris entre 2 000 et 160 000 environ.

4.213. Rayonnement

- Lois générales :

- loi de Lambert : on la suppose vérifiée. La luminance énergétique est la même dans toutes les directions de l'émission de l'échantillon et des parois du four. L'indicatrice de l'intensité émise est une sphère. Dans la pratique, cette indicatrice n'a une forme voisine de la sphère que pour des longueurs d'onde inférieures à 6μ , comme le montrent les indicatrices de réflexion d'un échantillon éclairé sous l'incidence de 30° avec la normale à sa surface (pl 23),
- formule de Bouguer : la température de surface intérieure du four n'étant pas uniforme, on définira une température moyenne T_2 à partir de trois températures de surfaces T_2' , T_2'' et T_2''' , pondérées par les coefficients intervenant dans la formule de Bouguer (75) :

$$T_2^4 = \frac{S_2' \frac{\cos^2 \gamma'}{r'^2} T_2'^4 + S_2'' \frac{\cos^2 \gamma''}{r''^2} T_2''^4 + S_2''' \frac{\cos^2 \gamma'''}{r'''^2} T_2'''^4}{S_2' \frac{\cos^2 \gamma'}{r'^2} + S_2'' \frac{\cos^2 \gamma''}{r''^2} + S_2''' \frac{\cos^2 \gamma'''}{r'''^2}}$$

dans laquelle :

T_2' , T_2'' et T_2''' sont les températures de surface ($^\circ K$),

S_2' , S_2'' et S_2''' les surfaces correspondantes (m^2),

γ' , γ'' et γ''' les angles que font les normales aux surfaces émettrices et réceptrices avec les droites reliant leurs centres,

r' , r'' et r''' les distances entre ces centres (m).

Pour calculer T_2^4 en $^\circ K^4$ connaissant T_1 en $^\circ C$, on se servira avantageusement du tableau de l'annexe 15

qui donne directement $\left(\frac{T_1}{100}\right)^4$ en $^\circ K^4$ (4),

- Variations des facteurs d'émission en fonction de différents paramètres :

- longueur d'onde : les facteurs de réflexion monochromatiques du réfractaire du four et des matériaux traités varient en fonction de la longueur d'onde (pl 24). Il en est donc de même des facteurs d'émission monochromatiques. En conséquence, les corps en présence ne se comportent pas comme des corps gris,
- température : les facteurs de réflexion monochromatiques varient peu avec la température, sous réserve que les matériaux ne subissent pas de transformations importantes susceptibles de modifier sensiblement leur état de surface, telles que la vitrification ou le frittage. On estime que ces variations n'excèdent pas 20 % entre 20 et 1 100 $^\circ C$ (82) (83).

Les facteurs totaux d'émission correspondant à une température T se déterminent par le rapport de deux surfaces A_0 et A_1 (ou A_2) définies comme suit :

A_0 : aire comprise entre la courbe des émittances monochromatiques du corps noir à la température T et l'axe des longueurs d'onde,

A_1 et A_2 : aires comprises entre la courbe déduite de la courbe précédente par l'affinité $\varepsilon_{1\lambda}$ et $\varepsilon_{2\lambda}$ et l'axe des longueurs d'onde.

$$\varepsilon_1 = \frac{A_1}{A_0} \quad \text{et} \quad \varepsilon_2 = \frac{A_2}{A_0}$$

Du fait de la loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_m T = 2886 \mu^\circ K \quad \text{où}$$

λ_m est la longueur d'onde correspondant au maximum de la luminance énergétique monochromatique du corps noir (μ),

T est la température du corps noir,

Les facteurs totaux d'émission diminuent lorsque la température augmente (74) (84). La valeur déterminée à température ambiante (annexe 16) est donc une valeur maximale.

On admettra que la variation des facteurs totaux de cette valeur à la valeur donnée à haute température par les ouvrages spécialisés (4) (84) (85) est linéaire.

Rappelons que plus de 95 % de l'énergie est rayonnée dans l'intervalle de longueur d'ondes compris entre $\frac{\lambda_m}{2}$ et $5\lambda_m$

état de surface : on supposera négligeable l'incidence de l'état de surface des échantillons traités. La mesure du facteur de réflexion monochromatique de la face polie et de la face rugueuse des carreaux de terre cuite montre que la différence n'apparaît que pour des longueurs d'ondes supérieures à 6μ et qu'elle est de l'ordre de 10 %. La forme des indicatrices de réflexion correspondantes témoignent de l'influence favorable de la rugosité sur la diffusion.

4.22. Détermination analytique de la diffusion de la chaleur

La cuisson de produits de forme simple (carreaux de terre cuite ou de grès) figure précisément au programme des essais. Leur épaisseur (9 mm) étant faible par rapport à leurs autres dimensions (100 à 120 mm), il paraît logique de ramener le problème de leur chauffage à celui du mur indéfini de même épaisseur. Il est également intéressant d'en rechercher la solution analytique, ne serait-ce que pour évaluer le gradient thermique interne du matériau, difficile à mesurer en raison de sa faible épaisseur. Après le rappel de la méthode de calcul basée sur la linéarité des équations de la chaleur (indéfinies et aux limites), il sera possible de déterminer une solution analytique simple.

4.221. Rappel de la méthode de calcul

- Mise en équation

La température $T(x,t)$ en un point x et à l'instant t doit vérifier le système d'équations suivant :

$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial x}$	Equation fondamentale
$q = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x}$	Loi de comportement thermique
$T(0,t) = T_0 + \Delta t$	} Conditions aux limites
$T(1,t) = T_0 + \Delta t$	
$T(x,0) = T_0$	Condition initiale

dans lequel :

- ρ est la masse spécifique (kg/m^3),
- c " la chaleur massique ($\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$),
- T " la température ($^\circ\text{C}$),
- t " le temps (heure),
- q " la densité de flux (kcal/m^2 heure),
- x " la distance du point considéré à une face du matériau,
- λ " la conductivité thermique équivalente ($\text{kcal/m heure } ^\circ\text{C}$)
- T_0 " la température uniforme du matériau en début de chauffage ($^\circ\text{C}$),
- Δ " la vitesse de montée en température ($^\circ\text{C/heure}$),
- l " l'épaisseur du matériau (m).

- Théorèmes généraux

Rappelons qu'en raison de la linéarité des équations précédentes, on peut énoncer les deux théorèmes suivants :

1. la solution d'un problème de réchauffement à partir d'une température initiale $T(x,0)$ par des sources à températures constantes correspond à la différence entre :

. la solution $T(x,\infty)$ représentant l'état de régime permanent vers lequel tend le système, et

. la solution $\Theta(x, t, 0)$ de son refroidissement à partir d'un état égal à cet état limite $T(x,\infty)$, diminué de l'état initial $T(x,0)$ par des sources à température nulle (pl 25).

$$T(x,t) = T(x,\infty) - \Theta(x,t,0)$$

2. la solution $T(x,t)$ d'un problème de réchauffement par des sources à température variable à partir de la température T_0 et du temps τ est égale à la somme de :

. la solution $\Theta(x, t, T_0)$ de l'échauffement du système par des sources à la température constante T_0 , et de

. l'intégrale de 0 à t de la fonction $\frac{\partial}{\partial \tau} \Theta(x, t-\tau, 0) \frac{dT}{d\tau}$:

$$T(x, t) = \Theta(x, t, T_0) + \int_0^t \frac{\partial}{\partial \tau} \Theta(x, t-\tau, 0) \frac{dT}{d\tau} d\tau$$

C'est le théorème de Duhamel.

Lorsque la température T_0 des sources est précisément égale à la température initiale du système, on a évidemment :

$$\Theta(x, t, T_0) = T_0$$

- Résultats préliminaires

Rappelons deux résultats partiels permettant d'aborder le problème de l'échauffement d'un mur (l, λ, c, ρ) dont les surfaces ont une température imposée fonction du temps :

1. Refroidissement du mur initialement à température uniforme T_0 par deux sources à température nulle. Les solutions simples de ce problème sont de la forme :

$$\Theta(x, t) = \varphi(x) e^{-mt}$$

$\varphi(x)$ étant solution de l'équation, tirée de l'équation de la diffusion :

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} + \frac{mc\rho}{\lambda} \varphi = 0$$

En posant $\alpha^2 = \frac{mc\rho}{\lambda} = \frac{m}{a}$ (a étant la diffusivité thermique du matériau), ces solutions sont de la forme :

$$\varphi = B_k \sin \frac{k\pi x}{l} \quad (k \text{ étant un entier positif})$$

Compte-tenu des conditions aux limites, la solution du refroidissement est de la forme :

$$\Theta(x, t) = B_1 \sin \frac{\pi x}{l} e^{-\frac{a\pi^2 t}{l^2}} + B_2 \sin \frac{2\pi x}{l} e^{-\frac{4a\pi^2 t}{l^2}} + \dots$$

La constante de temps la plus longue correspondant à $k = 1$ est appelée constante de temps fondamentale :

$$C = \frac{l^2}{a\pi^2}$$

La solution simple correspondante est la solution fondamentale.

...

Les coefficients B_k se calculent à l'aide de la formule :

$$B_k = T_0 \frac{\int_0^1 \sin \frac{k\pi x}{1} dx}{\int_0^1 \sin \frac{2k\pi x}{1} dx} = T_0 \frac{2}{k\pi} \left[1 - (-1)^k \right]$$

La solution générale a donc pour expression :

$$\Theta(x, t) = T_0 \frac{4}{\pi} \left[\sin \frac{\pi x}{1} e^{-\frac{t}{C}} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi x}{1} e^{-\frac{9t}{C}} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi x}{1} e^{-\frac{25t}{C}} + \dots \right]$$

2. Echauffement du mur initialement à température uniforme T_0 par deux sources à température constante T_1 .
En application du théorème 1 précédemment rappelé, on peut écrire la loi du réchauffement :

$$\Theta(x, t) = T_1 - \frac{4T_1}{\pi} \left[\sin \frac{\pi x}{1} e^{-\frac{t}{C}} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi x}{1} e^{-\frac{9t}{C}} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi x}{1} e^{-\frac{25t}{C}} + \dots \right] + T_0$$

A partir de cette loi, et en appliquant le théorème 2, il est possible de résoudre analytiquement le problème posé.

4.222. Solution analytique

- Equation générale

Imposons aux deux faces du mur une température qui varie en fonction du temps suivant la loi linéaire :

$$T = T_0 + \alpha t$$

α serait le coefficient directeur de la droite de cuisson ou la vitesse de chauffage.

Si les faces étaient maintenues à température fixe T_1 , la loi du réchauffement serait $\Theta(x, t)$ qui vient d'être écrite. En application du théorème 2, on peut écrire :

$$T(x, t) = T_0 + \int_0^t \frac{\partial \Theta(x, t - \tau, 0)}{\partial \tau} \frac{dT}{d\tau} d\tau$$

$$\text{Or, } \frac{\partial \Theta(x, t - \tau, 0)}{\partial \tau} = 1 - \frac{4}{\pi} \left[\sin \frac{\pi x}{1} e^{-\frac{t-\tau}{C}} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi x}{1} e^{-\frac{9(t-\tau)}{C}} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi x}{1} e^{-\frac{25(t-\tau)}{C}} + \dots \right]$$

et $\frac{dT}{d\tau} = \alpha$

$$\text{d'où } T(x, t) = T_0 + \int_0^t \left[1 - \frac{4}{\pi} \left(\sin \frac{\pi x}{1} e^{-\frac{t-\tau}{C}} + \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi x}{1} e^{-\frac{9(t-\tau)}{C}} + \frac{1}{5} \sin \frac{5\pi x}{1} e^{-\frac{25(t-\tau)}{C}} + \dots \right) \right] \alpha d\tau$$

$$T(x, t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha}{\pi} \left[\sum_{k \text{ impair}} \frac{C}{k^2} \cdot \frac{1}{k} \sin \frac{k\pi x}{1} e^{-k^2 \frac{t-\tau}{C}} \right]_0^t$$

$$T(x, t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha}{\pi} \left[\sum_{k \text{ impair}} \frac{C}{k^3} \sin \frac{k\pi x}{1} \left(1 - e^{-\frac{k^2 t}{C}} \right) \right]$$

La solution fondamentale est donc :

$$T(x, t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha C}{\pi} \sin \frac{\pi x}{1} \left(1 - e^{-\frac{t}{C}} \right)$$

Elle est représentée graphiquement sur la planche 26 et calculée dans le cas où $\frac{4\alpha C}{\pi} = 10$, correspondant sensiblement à l'exemple donné plus loin.

Après un temps t suffisamment grand par rapport à C , elle se réduit à :

$$T(x, t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha C}{\pi} \sin \frac{\pi x}{l}$$

- Ecart transversal de température

Dans ces mêmes conditions, l'écart de température entre la surface et le coeur de l'échantillon tend vers :

$$\Delta T = T(0, t) - T\left(\frac{l}{2}, t\right) \text{ soit}$$

$$\Delta T = \frac{4\alpha C}{\pi}$$

A titre d'exemple, calculons cet écart dans le cas d'un carreau de terre cuite. La diffusivité thermique a été mesurée par la méthode du signal périodique (annexe 17 et planche 27).

Les caractéristiques du matériau sont les suivantes :

$$\left. \begin{array}{l} \lambda = 0,5 \text{ kcal/m h } ^\circ\text{C} \\ \rho = 2\,080 \text{ kg/m}^3 \\ c = 0,16 \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C} \\ l = 0,009 \text{ m} \end{array} \right\} a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{0,5}{0,16 \times 2\,080} = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$$

La vitesse de chauffage est $\alpha = 1\,000 \text{ } ^\circ\text{C/h}$

$$\text{On sait que } C = \frac{l^2}{a\pi^2} = \frac{10^{-4}}{1,5 \times 10^{-3} \times \pi^2} = 6,75 \times 10^{-3} \text{ heure}$$

Après une heure de chauffage, t étant grand par rapport à C , on peut calculer ΔT sans erreur appréciable:

$$\Delta T = \frac{4 \times 1\,000 \times 6,75 \times 10^{-3}}{\pi} = 8,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4.23. Evaluation des échanges thermiques instantanés

4.231. Densité de flux total

Dans un intervalle de temps Δt , l'échantillon de masse m , de chaleur massique c et de surface totale exposée s , reçoit une quantité de chaleur ΔQ qui provoque une variation de température ΔT telle que

$$\Delta Q = m c \Delta T \text{ ou}$$

$$\frac{\Delta Q}{s \Delta t} = \frac{m c}{s} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Pour toutes les valeurs de t comprises dans les intervalles fermés (t_1, t_2) , (t_2, t_3) ... où l'allure de chauffage est constante, on peut définir :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{s \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m c}{s} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

ou, en supposant m , c et s constants comme convenu :

$$\frac{1}{s} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{m c}{s} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

Le premier membre de l'équation n'est autre que q_t , la densité de flux total reçu par l'échantillon, et la limite de $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ quand Δt tend vers 0 est le coefficient α , la vitesse de variation de température précédemment définie (§§ 4.11 et 4.222) :

$$q_t = \frac{m c}{s} \alpha$$

...

Dans les intervalles (t_1, t_2) , (t_2, t_3) ..., la densité de flux total est constante et la courbe $q_t(t)$ théorique est une courbe en escalier. En réalité, les angles de cette courbe sont arrondis, car les variations de densité de flux ne sauraient être instantanées.

Les échanges thermiques entre le four et l'échantillon s'effectuent uniquement par convection et par rayonnement, puisque les transferts par conduction du support peuvent être supposés négligeables.

4.232. Densité de flux de chaleur de convection

S'inspirant de l'idée de Reynolds que les phénomènes de frottement et de transfert thermique sont régis par les mêmes lois, Prandtl a développé en 1910 cette analogie en établissant la théorie de la couche limite en convection forcée. Il est démontré que, lorsque l'écoulement général du fluide est parallèle au plan de la surface d'échange, les nombres de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl sont liés par la relation (86) :

$$Nu = 0,323 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

dans laquelle :

$$Nu = \frac{h L}{\lambda}$$

$$Pr = \frac{\mu' c'}{\lambda}$$

$$Re = \frac{V L \rho'}{\mu'}$$

Nu, Pr et Re sont exprimés en fonction de :

h : le coefficient d'échange par convection ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$),

L : la longueur du plan d'échange parallèlement à l'écoulement (m),

λ : la conductivité thermique équivalente du matériau chauffé ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$),

λ' : la conductivité thermique du fluide ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$),

μ' : la viscosité absolue du fluide (kg/mh),

c' : la chaleur massique du fluide ($\text{kcal}/\text{kg}^\circ\text{C}$),

V : la vitesse du fluide à une distance suffisamment grande du plan d'échange pour être prise hors de la couche limite (m/h),

ρ' : la masse spécifique du fluide (kg/m^3).

La relation liant Nu, Pr et Re est représentée graphiquement sur la planche 28.

Connaissant la vitesse V et la température T_f du fluide à l'instant étudié, il est possible de déterminer ses autres caractéristiques (c' , ρ' , μ' , λ' , Pr) en utilisant les courbes de la planche 22 et de calculer h .

La densité de flux convectif ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$) est alors donnée par la formule générale :

$$Q_c = h (T_f - T_s),$$

dans laquelle T_s est la température de surface de l'échantillon.

4.233. Densité de flux de chaleur de rayonnement

L'échantillon à chauffer est baigné par l'azote de l'air comburant, l'oxygène, si cet air est en excès, et les gaz de combustion tels que le gaz carbonique, la vapeur d'eau et, le cas échéant l'oxyde de carbone et l'hydrogène (cf. diagramme de combustion planche 8). Les gaz simples (N_2 , O_2 et H_2)

sont complètement transparents au rayonnement sur toute l'étendue du spectre. Ils ne produisent aucun rayonnement lumineux et deviennent ainsi invisibles, même à haute température. Par contre, les gaz composés (CO_2 , H_2O et CO) présentent un spectre d'émission-absorption localisé uniquement dans l'infrarouge et composé de bandes distinctes plus ou moins larges et plus ou moins serrées. Ils émettent donc un rayonnement infra-rouge quand ils sont portés à température élevée (85).

Nous avons déjà signalé l'importance pratique du rayonnement des produits de combustion dans les fours (75). Rappelons dans le tableau ci-dessous les longueurs d'onde des bandes d'absorption de CO_2 ,

...

H₂O et CO et la proportion maximale de chacun de ces gaz dans les fumées en cours d'essai (87) :

Gaz	Longueur d'onde moyenne (μ)	Proportion maximale (%)
CO ₂	2,74	10
	4,30	
	15	
H ₂ O	1,14	14
	1,38	
	1,88	
	2,66	
	6,27	
CO	2,35	2
	4,67	

Le phénomène d'échange par rayonnement qui est déjà très complexe lorsque le milieu intermédiaire est inerte, se complique singulièrement, lorsque ce milieu absorbe et émet.

Calculons alors les flux rayonnants dans le cas de l'échange thermique entre deux cylindres coaxiaux C₁ et C₂ emprisonnant un gaz G. Les températures absolues sont respectivement T₁, T₂, T et les facteurs totaux d'émission (ou d'absorption) $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon$. Le cylindre C₁ est supposé intérieur au cylindre C₂, les surfaces sont S₁ et S₂. Il faut déterminer successivement les échanges ϕ_{1-2} , ϕ_{2-1} , ϕ_{2-G} , ϕ_{G-1} pour établir le bilan de la chaleur perdue (ou gagnée) par l'échantillon :

$$\phi = \phi_{1-2} - \phi_{2-1} + \phi_{1-G} - \phi_{G-1}$$

Pour calculer ϕ_{1-2} et ϕ_{2-1} , nous avons retracé sur les planches 29 et 30 l'histoire des flux initiaux ϕ_1 et ϕ_2 . La méthode est la même dans les deux cas : on appelle ϕ la part du rayonnement de C₂ se dirigeant vers C₁, (1 - ϕ) étant évidemment la part complémentaire du rayonnement de C₂ sur lui-même.

ϕ_{1-G} a été calculé à partir du bilan suivant :

$$\phi_{1-G} = \phi_1 - \phi_{1-2} - \phi_{1-1}$$

ϕ_{1-1} étant la densité de flux de chaleur du rayonnement de C₁ sur lui-même.

ϕ_{G-1} a été déterminé également par un bilan.

Sans donner le détail des calculs qui alourdirait ce chapitre, nous transcrivons ci-dessous les résultats dans le cas général des deux cylindres C₁ et C₂. On appelle $\sigma = 4.93 \times 10^{-8}$ kcal/m²h°k⁴ la constante de Stephan ; on exprime S₁ et S₂ en m² et T, T₁ et T₂ en °k.

$$\phi_{1-2} = \frac{(1 - \epsilon) \epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \phi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \phi)} \sigma S_1 T_1^4 \quad (\text{kcal/h})$$

$$\phi_{2-1} = \frac{(1 - \epsilon) \epsilon_1 \epsilon_2 \phi}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \phi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \phi)} \sigma S_2 T_2^4 \quad (")$$

$$\phi_{1-1} = \frac{(1 - \epsilon)^2 \epsilon_1^2 (1 - \epsilon_2) \phi}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \phi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \phi)} \sigma S_1 T_1^4 \quad (")$$

$$\phi_{1-G} = \frac{\epsilon \epsilon_1 [1 + (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2) \phi]}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \phi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \phi)} \sigma S_1 T_1^4 \quad (")$$

...

$$\phi_{G-1} = \frac{\epsilon \epsilon_1 \left[1 + (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2) \varphi \right] \varphi}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \varphi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \varphi)} \sigma S_2 T^4 \quad (\text{kcal/h})$$

On remarquera que le facteur de rayonnement est mutuel pour chaque couple $\phi_{1-2} = \phi_{2-1}$ et $\phi_{1-G} = \phi_{G-1}$. L'échange total peut alors s'écrire :

$$\phi = \frac{\epsilon_1 \sigma}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \varphi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \varphi)} \left\{ (1 - \epsilon) \epsilon_2 (S_1 T_1^4 - \varphi S_2 T_2^4) + \epsilon \left[1 + (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2) \varphi \right] (S_1 T_1^4 - \varphi S_2 T_2^4) \right\}$$

Cas particuliers :

. Lorsque $T_1 = T_2 = T$, le flux ϕ doit être nul. Donc on en déduit la valeur de φ :

$$\varphi = \frac{S_1}{S_2} \quad \text{et l'échange total s'écrit :}$$

$$\phi = \frac{\epsilon_1 \sigma S_1}{1 - (1 - \epsilon)^2 (1 - \epsilon_1)(1 - \epsilon_2) \varphi - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \varphi)} \left\{ (1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) + \epsilon \left[1 + (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2) \varphi \right] (T_1^4 - T_2^4) \right\}$$

. Lorsque $S_1 = S_2$, soit $\varphi = 1$, on est ramené au cas des échanges de chaleur entre deux plans parallèles à travers des couches de gaz qui absorbent et émettent. Les expressions précédentes se simplifient et l'on retrouve les valeurs applicables à ce cas particulier.

. Lorsque dans ces formules ϵ est égal à zéro, on retrouve également les valeurs applicables au cas des échanges entre deux cylindres séparés par un milieu intermédiaire dont on néglige l'absorption.

. Lorsque S_1 est très faible par rapport à S_2 , ces expressions se simplifient comme suit :

$$\phi_{1-2} = \frac{(1 - \epsilon) \epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \sigma S_1 T_1^4 \quad (\text{kcal/h})$$

$$\phi_{2-1} = \frac{(1 - \epsilon) \epsilon_1 \epsilon_2}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \sigma S_2 T_2^4 \quad (\quad " \quad)$$

$$\phi_{1-G} = \frac{\epsilon \epsilon_1}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \sigma S_1 T_1^4 \quad (\quad " \quad)$$

$$\phi_{G-1} = \frac{\epsilon \epsilon_1}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \sigma S_1 T^4 \quad (\quad " \quad)$$

$$\phi = \frac{\epsilon_1 \sigma S_1}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \left[(1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) + \epsilon (T_1^4 - T^4) \right] \quad (\text{kcal/h})$$

On pourra retenir ces formules simplifiées dans le cas des carreaux et des assiettes ainsi que le montre le tableau ci-dessous :

	Carreau	Brique	Assiette
$S_1 \text{ (m}^2\text{)}$	0,023	0,200	0,110
$S_2 \text{ (m}^2\text{)}$	1,350	1,350	1,350
$\varphi = \frac{S_1}{S_2}$	0,017	0,150	0,081

Le facteur d'émission ϵ d'un gaz est une fonction de sa température T , et du produit de sa pression partielle p par l'épaisseur l de la couche rayonnante (loi de Beer) (75). C'est pourquoi, en raison des faibles concentrations de CO et H_2 dans les produits de combustion et de la faible épaisseur de la couche de gaz (0,15 m), leur rayonnement sera négligé.

Pour CO_2 et H_2O , il existe des abaques donnant la valeur du facteur d'émission ϵ en fonction du produit pl , l étant alors le rayon d'un hémisphère de gaz rayonnant sur son centre. Ces abaques sont représentés sur la planche 31. On se ramène à ce cas théorique par application d'une formule empirique et approchée :

$$l = 0,9 \frac{4V}{S}$$

où V est le volume de l'enceinte gazeuse (m^3)

S est sa surface (m^2)

Dans le cas du four expérimental : $V = 0,05 \text{ m}^3$

$$S = 0,65 \text{ m}^2$$

$$\text{donc } l = 0,28 \text{ m}$$

Les courbes donnant ϵ pour la vapeur d'eau en fonction de la température absolue et du produit pl supposent le système "idéal" correspondant à une pression partielle de vapeur d'eau nulle (88). Elles doivent être corrigées par un facteur également donné par un abaque, qui est de 1,1 pour les conditions de fonctionnement du four.

Enfin, si CO_2 et H_2O sont présents simultanément, il faut tenir compte que leurs spectres ont certaines zones de recouvrement et que les deux fluides sont ainsi légèrement opaques l'un pour l'autre. Le facteur total d'émission ou d'absorption de leur mélange est donc, en raison de ces interférences, inférieur à la somme des gaz composants, supposés seuls. Dans la pratique, cette correction peut être négligée pour les faibles valeurs de pl .

4.234. Représentation graphique

Il est intéressant de faire figurer sur le même diagramme la variation des densités de flux total q_t , de chaleur de convection q_c et de chaleur de rayonnement q_r en fonction du temps t . A chaque instant t , ces trois valeurs doivent vérifier l'équation du bilan thermique :

$$q_t = q_c + q_r$$

Pour tracer ces courbes il est nécessaire de connaître, entre autre, l'évolution pendant le même temps, des températures T_1 de l'échantillon, T_2 des parois du four et T des produits de combustion au voisinage de l'échantillon. C'est pourquoi il faut également tracer ces trois courbes sur le graphique (pl 32).

CHAPITRE V

Expérimentation

5. EXPERIMENTATION

5.1. Réduction des cycles de la terre cuite

5.11. Carreaux

5.111 Généralités sur le matériau

Origine: les carreaux traités sont appelés "tomettes". Ils sont fabriqués dans la région de Salernes (Var) et sont destinés aux revêtements de sol. Ils sont actuellement cuits à 1050° C dans des fours intermittents de 50m³ de capacité moyenne, ou dans des fours continus de faible section de passage. Dans le premier cas, la durée de cuisson (enfournement et défournement exclus) est de l'ordre de 17 jours ; dans le second, elle est encore de 15 heures environ (10).

Composition chimique (% poids) :

SiO ₂	56.45
Al ₂ O ₃	21.61
TiO ₂	1.00
Fe ₂ O ₃	6.22
CaO	2.78
MgO	1.95
K ₂ O	2.74
Na ₂ O	0.23
LiO ₂	-
Perte au feu	7.41
Total	100.39

Caractéristiques physiques :

- dimensions : la forme et les dimensions des échantillons sont représentées sur la figure 1 de la planche 33, ainsi que le logement des thermocouples et le support métallique,
- dilatation - retrait : leurs variations en fonction de la température sont représentées sur la figure 1 de la planche 20. Le gonflement qui apparaît à partir de 400°C et qui est dû au départ de l'eau de constitution, est propre aux argiles illitiques ou micacées, (annexe 7 § 6.2.)
- masse unitaire : 0,175 kg,
- masse volumique apparente : 2.080 kg/m³
- porosité ouverte : 24.5 %,
- chaleur massique moyenne à 37°C : 0,16 kcal/kg°C (annexe 14),
- diffusivité thermique à 44°C : 1,5.10⁻³ m²/heure,
- conductivité thermique équivalente :
 - . de l'échantillon cru à 44°C : 0,5 kcal/mh°C,
 - . de l'échantillon vitrifié à 500°C : 1,0 kcal/mh°C,
- analyse thermique différentielle : planche 20 figure 2. Le crochet endothermique du point quartz à 573°C est apparent,
- facteur d'émission monochromatique : sa variation en fonction de la longueur d'onde à la température de 300° K est représentée sur la planche 24,
- facteur total d'émission à 300° K : 0,85,
 - à 1 300° K : 0,45 (85),
- indicatrice de réflexion à 300° K : planche 23.

...

5.112. Détermination de la courbe de chauffage- Vitesse critique de chauffage V_c entre T_0 et 1050°C

N°	Temps h - min.	Vitesse $^\circ\text{C}/\text{min.}$	Résultats
1	0h 10 *	105	Rupture à 600°C
2	0h 20 *	52	Rupture à 600°C
3	0h 25 *	42	Rupture à 600°C
4	0h 35	30	Coeur noir
5	0h 45	23	Coeur noir

* valeurs extrapolées

Les nombreuses ruptures à 600°C confirment l'existence d'une zone dangereuse en cours de chauffage. La vitesse critique correspondante est de $30^\circ \text{C}/\text{heure}$ environ, relative à un temps de cuisson de 0h 35 minutes. La présence d'un coeur noir au sein de l'échantillon signifie que la combustion des matières organiques a été incomplète (89). Il y aura donc lieu de prévoir, en cours de cuisson, soit un palier de température, dont il faudra déterminer le niveau et la durée (67), soit un ralentissement entre certaines températures. Néanmoins, on peut d'ores et déjà penser que la cuisson aura lieu dans un temps de l'ordre d'une heure. C'est donc pour une telle durée qu'il faut déterminer la température de cuisson T_c .

- Température de cuisson T_c

N°	Température $^\circ\text{C}$	Temps h - min.	Vitesse $^\circ\text{C}/\text{min.}$	Résultats
6	1140	1h 08	17	Flèche 1.2 mm - Couleur incorrecte
7	1120	1h 08	16	Flèche 1.0 mm - Couleur incorrecte
8	1110	1h 05	17	Flèche faible - Couleur incorrecte
9	1080	1h 05	17	Flèche néant - Couleur satisfaisante

La température de cuisson est donc de 1080°C pour un temps de chauffage de l'ordre d'une heure. La réduction du cycle à cette valeur doit être compensée par une élévation de température de cuisson de 30°C . Les essais ultérieurs seront donc conduits à 1080°C .

- Vitesse V_o de T_o à 600° C

N°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
10	2	70	Rupture à 160° C
11	5	60	Rupture à 300° C
12	7	45	Rupture à 350° C
13	16	35	Satisfaisant

Aux vitesses élevées, la rupture de l'échantillon est due à l'élimination brutale de l'eau de constitution et au retrait qu'elle entraîne. La vitesse limite de chauffage de la température initiale à 600° C est donc de 35° C/minute.

- Combustion des matières organiques

- plage de température : nous la déterminons approximativement par l'exécution de paliers d'une durée arbitraire de 12 minutes à différents niveaux :

N°	Température °C	Durée h - min.	Résultats
14	525	0h 12	Epaisseur du coeur noir : 3.5 mm
15	600	0h 12	Epaisseur du coeur noir : 2.0 mm
16	740	0h 12	Epaisseur du coeur noir : 2.5 mm
17	800	0h 12	Epaisseur du coeur noir : 3.5 mm

Il existe une plage de température optimale de combustion des matières organiques. En effet, la température doit être suffisamment élevée pour que les réactions d'oxydation aient lieu à une vitesse sensible, mais suffisamment basse pour que la porosité de la pâte permette encore la diffusion des gaz (oxygène et produits de la réaction). Cette plage de température optimale se situe donc approximativement entre 600 et 750° C. Le début de la plage permet de recouvrir quelque peu la zone dangereuse (point quartz).

- Vitesse de chauffage entre 600 et 750° C

N°	Vitesse °C/min.	Durée entre 600 et 750° C-min.	Résultats
18	30	5	Epaisseur du coeur noir : 4.0 mm
19	10	15	Epaisseur du coeur noir : 1.5 mm
20	5	30	Epaisseur du coeur noir : 1.0 mm
21	4,5	34	Satisfaisant

Le franchissement de la plage comprise entre 600 et 750° C à la vitesse de 4.5° C/min., correspondant à un temps de 34 minutes, permet d'éliminer les matières organiques incluses dans l'argile. Cette vitesse étant largement inférieure à la vitesse critique précédemment déterminée, elle est compatible avec le franchissement de la zone dangereuse.

- Vitesse V_1 de 750 à 1080° C

N°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
22	3	90	Boursoufflures importantes
23	5,5	50	Boursoufflures légères
24	6	45	Fentes de cuisson
25	8	35	Satisfaisant

L'apparition de boursoufflures ou de fentes de cuisson est due à la dissociation tardive des carbonates : l'élimination du CO_2 est contrariée par la vitrification de l'argile. Une vitesse réduite à 35 °C/min. permet d'éviter ce défaut.

5.113. Détermination de la courbe de refroidissement

- Vitesse critique de refroidissement V'_c de 1080 à 150°C

N°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
26	38	25	Satisfaisant
27	11	85	Satisfaisant
28	8	120	Satisfaisant

Le matériau supporte des refroidissements extrêmement rapides ; sa rupture n'a pas pu être obtenue. En fait, la limite est imposée par le four qui ne peut, malgré la mise en action à pleine puissance des deux ventilateurs, refroidir le matériau à plus de 120°C par minute. Il n'est donc pas possible, dans le cas présent, de fractionner l'intervalle $1080\text{--}150^{\circ}\text{C}$ comme prévu au mode opératoire. En vue de ménager une marge de sécurité, on retiendra un temps de refroidissement de 10 min., correspondant à une vitesse moyenne de 95°C/min.

5.114. Courbe résultante de cuisson

En résumé, les caractéristiques de la courbe minimale sont les suivantes :

Intervalle de température $^{\circ}\text{C}$	Vitesse $^{\circ}\text{C/min.}$	Temps min.
T_0 à 600	35	17
600 à 750	4,5	34
750 à 1080	35	9
1080 à 150	95	10
Total	—	70

Elles ont été représentées schématiquement sur la figure 1 de la planche 34.

En conclusion, le cycle de cuisson des carreaux de terre cuite peut être réduit à 1 heure 10 minutes environ, et décomposé comme suit :

- chauffage de la température ambiante à 1080°C : 1 heure,
- refroidissement de 1080 à 150°C : 0 heure 10 minutes.

5.115. Evaluation des échanges thermiques

Nous avons figuré, en annexe 18, les éléments de calcul des échanges thermiques instantanés à quatre niveaux de température (400 , 700 , 1000 et 500°C), au cours de la cuisson type n° 28. Nous rappelons dans le tableau ci-dessous, les densités de flux échangé par convection et par rayonnement ($\text{kcal/m}^2\text{h}$), après répartition de l'erreur entre la convection et le rayonnement.

Température	400°C	700°C	1000°C	500°C
Convection	18 900	18 985	21 930	— 106 050
Rayonnement	— 15 700	— 18 615	— 15 670	90 750
Total	3 200	370	6 260	— 15 300

5.12. Brique5.121. Généralités sur le matériau

Origine : les briques traitées sont actuellement fabriquées dans la région parisienne à partir d'une argile marneuse. Elles sont cuites en four tunnel à 950° C. Le temps de chauffage est de 14 heures, le temps de refroidissement de 14 heures également. Le cycle total est donc de 28 heures.

Composition chimique (% poids) :

SiO ₂	61.72
Al ₂ O ₃	11.27
TiO ₂	0.53
Fe ₂ O ₃	3.72
CaO	7.50
MgO	3.68
K ₂ O	3.37
Na ₂ O	0.23
LiO ₂	-
Perte au feu	7.54

Total 99.56

Caractéristiques physiques :

- dimensions : la forme et les dimensions des échantillons sont représentées sur la figure 2 de la planche 33, ainsi que le logement des thermocouples.
- dilatation - retrait : leurs variations en fonction de la température sont représentées sur la figure 1 de la planche 21. Le ralentissement du retrait apparent vers 850°C est dû à la décomposition du carbonate de chaux qui entre pour une part importante dans la composition de la brique,
- masse unitaire : 3,950 kg,
- masse volumique apparente : 1.970 kg/m³,
- porosité ouverte : 28,0 %,
- chaleur massique moyenne à 37°C : 0,16 kcal/kg°C,
- diffusivité thermique moyenne à 44°C : $1,5 \times 10^{-3}$ m²/heure,
- conductivité thermique équivalente :
 - . de l'échantillon cru à 44°C : 0,5 kcal/mh°C,
 - . de l'échantillon vitrifié à 500°C : 1,0 kcal/mh°C,
- analyse thermique différentielle : planche 21 figure 2. Le crochet endothermique du point quartz à 573°C et la décomposition endothermique des carbonates à partir de 600° C sont apparents,
- facteur total d'émission à 300° K : 0,85
à 1 300° K : 0,45 (85).

...

- Vitesse critique de chauffage V_c entre T_0 et 950°C

N°	Temps h - min.	Vitesse $^\circ\text{C}/\text{min.}$	Résultats
1	0h 45	21.0	1 fente - coeur noir $e = 6\text{ mm}$
2	0h 59	16.0	2 fentes - coeur noir $e = 5\text{ mm}$
3	1h 21	11.5	1 fente - coeur noir $e = 4\text{ mm}$
4	1h 45	9.0	Pas de fente - coeur noir $e = 4\text{ mm}$

La vitesse critique V_c recherchée est donc de $9.0^\circ\text{C}/\text{min.}$ La présence d'un coeur noir indique la nécessité de brûler correctement les matières organiques pour obtenir un résultat entièrement satisfaisant. Comme pour le carreau, la plage de combustion idéale doit se situer entre 600 et 750°C .

- Température de cuisson

La température de 950°C convient à la cuisson en 1h 45, elle conviendra donc a fortiori à des cuissons d'une durée comprise entre cette valeur et 14 heures, valeur actuellement pratiquée.

- Localisation de la zone dangereuse

Les essais 1 à 4 n'ayant pas permis de localiser la zone de température dans laquelle se produisent les fentes, il faut les compléter par les essais suivants effectués à la vitesse de $21.0^\circ\text{C}/\text{min.}$ déjà adoptée pour l'essai n° 1.

N°	Température finale $^\circ\text{C}$	Résultats
5	650	Pas de fente
6	850	Pas de fente

Les fentes se produisent donc dans la plage de température comprise entre 850 et 950°C . C'est elle qu'il faudra franchir à la vitesse critique précédemment trouvée $V_c = 8.5^\circ\text{C}/\text{min.}$

- Vitesse V_0 de T_0 à 600°C

N°	Temps min.	Vitesse $^\circ\text{C}/\text{min.}$	Résultats
7	15,5	37,5	1 fente
8	19,0	30,0	Satisfaisant

La vitesse de chauffage entre T_0 , température d'enfournement, et 600°C est donc de $30^\circ\text{C}/\text{min.}$, correspondant à une durée de 20 minutes.

5.123. Détermination de la courbe de refroidissement- Vitesse critique de refroidissement V'_c de 950 à 150°C

N°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
13	27	30	Satisfaisant
14	16	50	Satisfaisant

On adoptera donc la vitesse de 50° C/min. pour le refroidissement.

5.124. Courbe résultante de cuisson

La courbe de cuisson se décompose donc comme suit :

Intervalle de température °C	Vitesse °C/min.	Temps min.
T ₀ à 600	30	20
600 à 750	1	145
750 à 950	9	22
950 à 150	50	16
Total	-	205

Elle a été représentée schématiquement sur la figure 2 de la planche 34.

En conclusion, le cycle de cuisson des briques peut être réduit à 3 h 25 environ et décomposé comme suit :

- chauffage de la température ambiante à 950° C : 3 heures 10,
- refroidissement de 1080 à 150° C : 0 heure 15 minutes.

5.125. Evaluation des échanges thermiques

Nous avons figuré, en annexe 19, les éléments de calcul des échanges thermiques instantanés à quatre niveaux de température (400, 700, 1000 et 500°C) au cours de la cuisson type n° 12. Nous rappelons dans le tableau ci-dessous, les densités de flux échangé par convection et par rayonnement (kcal/m²h), après répartition de l'erreur entre la convection et le rayonnement.

Température	400°C	700°C	1000°C	500°C
Convection	6 310	3 930	10 280	- 11 715
Rayonnement	-3 970	-3 770	-9 580	5 915
Total	2 340	160	700	-5 800

Après avoir exposé :

- la méthode d'essai et de décomposition de la courbe de cuisson en plusieurs segments de droite, correspondant à des densités constantes de flux de chaleur absorbée,
- les considérations théoriques sur les échanges thermiques,
- le compte-rendu des essais effectués sur des carreaux et des briques de terre cuite,

nous allons poursuivre l'expérimentation par la cuisson d'assiettes de faïence (cuissons de biscuit et d'émail) et des carreaux de grès.

5.2. Réduction des cycles de la faïence

5.21. Cuisson de biscuit : assiettes

5.211. Généralités sur le matériau

Origine : les assiettes traitées sont fabriquées en série dans une faïencerie du Nord. Elles sont cuites à 1 260 °C dans un four tunnel (cuisson de biscuit). La durée du cycle est de 20 heures.

Composition chimique (% poids) :

Si O ₂	65,03
Al ₂ O ₃	23,45
Ti O ₂	0,71
Fe ₂ O ₃	0,79
Ca O	0,33
Mg O	0,20
K ₂ O	0,65
Na ₂ O	0,47
Li O ₂	traces
Perte au feu	7,79
Total	99,42

C'est la composition d'une faïence fine feldspathique (annexe 8).

Caractéristiques physiques :

- dimensions : la forme et la dimension des échantillons sont représentées sur la figure 1 de la planche 36, ainsi que la position des thermocouples.
- dilatation - retrait : leurs variations en fonction de la température sont représentées sur la figure 1 de la planche 37. Le retrait relatif qui apparaît vers 450°C et disparaît vers 600°C est caractéristique d'une argile kaolinique (annexe 7 - § 6.1)
- masse unitaire : 0,370 kg,
- masse volumique apparente : 1.660 kg/m³,
- porosité cuverte : 30,5 %,
- chaleur massique moyenne à 90°C : 0,25 kcal/kg °C,
- diffusivité thermique moyenne à 54°C : $1,2 \times 10^{-3}$ m²/h,
- conductivité thermique équivalente :
 - . de l'échantillon cru à 54°C : 0,5 kcal/mh°C,
 - . de l'échantillon vitrifié à 500°C : 1,1 kcal/mh°C,
- analyse thermique différentielle : planche 37 figure 2,
Le caractère kaolinique de l'argile est confirmé par l'important "crochet" endothermique qui correspond à l'élimination de l'eau de constitution de 450 à 600°C.
- facteur total d'émission à 300°K : 0,80,
à 1 300°K : 0,40.

5.212. Détermination de la courbe de chauffage

Ces premiers essais mettent en évidence quatre difficultés :

- . une température de cuisson plus élevée de près de 200°C par rapport aux essais précédents, entraîne une diminution sensible de la vitesse maximale de chauffage permise par le four. Il faut donc augmenter sa charge thermique ; rappelons que celle-ci a été définie à la page 28 du troisième chapitre. La puissance des brûleurs ne pouvant être augmentée, il est nécessaire de réduire le volume du four au moyen de briques disposées à plat sur la sole,
- . le débit d'air de dilution des produits de combustion est limité par le risque de mise en sustentation de l'assiette dans le four. En effet, on a constaté que pour des vitesses de vent supérieures à 60 km/h (17 m/sec.) l'échantillon pouvait être entraîné par le courant d'air.

...

Comme on ne peut envisager de lester les produits à cuire dans un four industriel, ce débit d'air de dilution a été maintenu à une valeur acceptable,

- l'impact direct des produits de combustion sur les bords de l'assiette provoque une surchauffe locale entraînant la formation de fissures ou "fentes de chauffage". Cet effet de bord ne peut être éliminé que par l'interposition d'un écran réfractaire d'une épaisseur suffisante entre l'échantillon et les brûleurs (voir tableau ci-après).

Les cuissons correspondantes sont effectuées à la vitesse constante de 30 °C/min. environ.

n°	Hauteur de l'écran (mm)	Résultats
1	néant	nombreuses fentes de chauffage : 2 mm < l < 15 mm
2	25	2 fentes de chauffage : l = 1 mm
3	40	pas de fentes de chauffage

- la déformation de l'échantillon ne peut être évitée que par un chauffage très homogène et un cycle de cuisson judicieusement choisi. Cette déformation s'évalue en retournant l'assiette sur une surface parfaitement plane et en mesurant l'intervalle maximal entre son bord et la surface de référence, lorsqu'elle est appliquée par trois points.

Par contre, la pureté de l'argile et la faible épaisseur des échantillons (5 mm au maximum) n'entraînent aucun risque de formation de cœur noir.

- vitesse critique de chauffage V_c entre 10 et 1 260 °C

La rapidité de la cuisson est limitée par les possibilités du four et non par celles du matériau. C'est ainsi que la vitesse limite de 32,5 °C/min. ne produit pas d'incidents. Les essais montrent qu'en cuisson unitaire la diminution de la vitesse de chauffage entraîne une augmentation de la déformation :

n°	Temps h-min.	Vitesse °C/min.	Résultats
4	0 h 38	32,5	satisfaisant
5	1 h 35	13,0	déformation : 5 mm
6	2 h 45	7,5	déformation : 10 mm
7	4 h 35	4,5	déformation : 12 mm

En cuisson traditionnelle, cet inconvénient n'existe pas, car les assiettes sont cuites empilées et s'épaulent mutuellement.

- température de cuisson

Pour une durée de cuisson de l'ordre de 40 minutes, la température de 1 260 °C convient parfaitement. C'est elle qui sera donc retenue lors des essais suivants.

- localisation de la zone dangereuse

La déformation ne doit logiquement se produire qu'à partir d'une certaine température, lorsque la vitrification commence. Il convient donc de déterminer approximativement cette température, en interrompant les essais à différents niveaux. La vitesse correspondante est choisie arbitrairement voisine de 30 °C/min.

n°	Température finale °C	Résultats
8	800	satisfaisant
9	1 000	satisfaisant
10	1 100	déformation : 1,5 mm

La zone où se produisent les déformations se situe, par conséquent, entre 1 000 et 1 260 °C.

- vitesse V_c de T_0 à 1 000 °C

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
11	8	120	satisfaisant
12	7	140	satisfaisant
13	6	160	satisfaisant
14	5	195	satisfaisant

Il est possible de porter très rapidement les échantillons à la température de 1 000 °C. Le temps de 5 minutes est le temps minimal que l'on puisse obtenir du four. Dans le but de ménager une marge de sécurité, on retiendra pour V_0 la valeur de 140 °C/min., correspondant à un temps de 7 minutes.

- vitesse V_1 de 1 000 à 1 260 °C

Elle a été déterminée précédemment par l'essai n° 4, puisque la vitesse $V_c = 32,5$ °C/min. permet de franchir la zone dangereuse sans déformation. En arrondissant sa valeur, on retiendra $V_1 = 30$ °C/min, correspondant à un temps de 8 minutes environ.

5.213. Détermination de la courbe de refroidissement

- vitesse critique de refroidissement V'_c entre 1 260 et 100 °C

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
15	7	165	1 fente de refroidissement
16	13	90	1 fente de refroidissement
17	15	75	satisfaisant
18	20	60	satisfaisant

on adoptera donc la vitesse V'_c de 75 °C/min. pour le refroidissement, correspondant à un temps de 15 minutes.

5.214. Courbe résultante de cuisson

La courbe de cuisson recherchée se décompose ainsi :

Intervalle de température °C	Vitesse °C/min.	Temps minutes
T_0 à 1 000	140	7
1 000 à 1 260	30	8
1 260 à 100	75	15
Total	-	30

Elle a été représentée schématiquement sur la figure 1 de la planche 38.

En conclusion, le cycle de cuisson en biscuit d'une assiette de faïence fine feldspathique peut être réduit à 30 minutes environ et décomposé comme suit :

- chauffage de la température T_0 à 1 260 °C 15 minutes
- refroidissement de 1 260 à 100 °C 15 minutes

5.215. Evaluation des échanges thermiques

Nous avons figuré en annexe 20 les éléments de calcul des échanges thermiques instantanés à quatre niveaux de température (400, 700, 1 100 et 500 °C) au cours de la cuisson type n° 17.

Nous rappelons dans le tableau ci-dessous les densités de flux échangé par convection et par rayonnement (kcal/m²h) après équipartition de l'erreur entre la convection et le rayonnement.

Température	400 °C	700 °C	1 100 °C	500 °C
Convection	15 955	26 200	24 480	- 10 155
Rayonnement	- 8 255	- 18 500	- 22 820	6 005
Total	7 700	7 700	1 660	- 4 150

5.22. Cuisson d'émail : assiettes :

5.221. Généralités sur le matériau

Origine : les assiettes traitées sont fabriquées dans la même faïencerie du Nord que les assiettes précédentes. La cuisson d'émail s'effectue actuellement à une température comprise entre 1 080 et 1 130 °C dans un four tunnel. La durée du cycle est de 15 heures.

Caractéristiques physiques :

- dimensions : elles sont identiques à celles des assiettes utilisées pour la cuisson d'émail (pl. 36 fig. 1),
- dilatation : les variations de longueur d'un échantillon standard de 5 mm x 5 mm x 32,5 mm sont représentées sur la planche 39. La présence de cristobalite et de quartz se manifeste respectivement aux environs de 200 et 570°C (cf. deuxième chapitre §§ 2.33 et 2.44). Sur cette même planche, a été figurée la courbe de dilatation d'un échantillon après cuisson en biscuit dans le four expérimental, pour permettre la comparaison,
- masse unitaire : 0,370 kg,
- masse volumique apparente : 2.000 kg/m³,
- porosité ouverte : 23,7 %,
- chaleur massique moyenne à 85°C : 0,20 kcal/kg°C,
- diffusivité thermique moyenne à 50°C : $2,5 \times 10^{-3}$ m²/h,
- conductivité thermique de l'échantillon : à 50°C : 1,0 kcal/mh°C,
à 500°C : 1,1 kcal/mh°C,
- facteur total d'émission à 300°K : 0,75,
à 1 300°K : 0,35.

5.222. Détermination de la courbe de chauffage

Deux des quatre difficultés signalées au § 5.212 à l'occasion de la cuisson de biscuit subsistent pour la cuisson d'émail :

- le débit d'air de dilution est limité par le risque de mise en sustentation de l'assiette dans le four,
- l'impact direct des produits de combustion sur les bords de l'assiette provoque une surchauffe et des fissures. Il faut interposer un écran de 50 mm d'épaisseur entre les brûleurs et l'échantillon. Par contre, plus aucune déformation n'est à craindre, les échantillons ayant été préalablement cuits en "biscuit" à une température supérieure à la température de cuisson d'émail.

- vitesse critique de chauffage V_c entre T_0 et 1 100 °C

La température de 1 100 °C est une température arbitraire choisie à l'intérieur de l'intervalle de la cuisson traditionnelle (1 080, 1 130 °C).

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
1	5	215	Echantillon incuit
2	7	155	Echantillon incuit
3	9	120	Echantillon incuit
4	25	45	Presque satisfaisant

La vitesse maximale de chauffage permise par le four jusqu'à 1 100 °C (215 °C/min) ne provoque pas d'autres incidents qu'une vitrification incomplète. Si une vitesse sensiblement plus faible (55 °C/min) ne permet pas d'obtenir un résultat entièrement satisfaisant, c'est que la température retenue (1 100 °C) est insuffisante pour assurer une vitrification complète de l'émail. Il faut donc rechercher la température convenable pour une durée de cuisson de l'ordre de 20 minutes.

- température de cuisson T_c

n°	Température °C	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
5	1 080	24	45	Echantillon incuit
6	1 120	21	50	Satisfaisant
7	1 140	18	60	Email piqué
8	1 160	17	70	Email piqué

Les piqûres qui apparaissent à la surface de l'émail sont le signe d'une surcuisson. La température de cuisson est donc $T_c = 1\ 120\ ^\circ\text{C}$, pour un temps de chauffage d'environ 20 minutes. Les essais ultérieurs doivent être effectués à cette température.

En raison de l'absence d'incident entre T_0 et T_c , deux courbes de chauffage sont réalisables a priori pour atteindre la température T_c :

- . une droite unique moyennement inclinée de T_0 à $1\ 120\ ^\circ\text{C}$,
- . une droite fortement inclinée de T_0 à $1\ 120\ ^\circ\text{C}$, suivie d'un palier à $1\ 120\ ^\circ\text{C}$.

Il faut expérimenter ces deux solutions pour déterminer laquelle est la meilleure.

- cuisson sans palier

n°	Durée min.	Résultats
12	7	Email légèrement piqué
13	10	Email piqué
14	15	Email fortement piqué

L'exécution d'un chauffage rapide suivi d'un palier ne permet pas d'obtenir un résultat satisfaisant. Il semblerait que la réalisation d'un palier de température - même très court - entraîne une détérioration de l'émail. Des deux solutions envisagées précédemment, seule la première est à retenir. Elle correspond à un chauffage régulier pendant 25 minutes à la vitesse de $45\ ^\circ\text{C}/\text{min}$.

5.223. Détermination de la courbe de refroidissement- vitesse critique de refroidissement V_c entre $1\ 120$ et $100\ ^\circ\text{C}$

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
15	5	225	Rupture
16	7	160	Satisfaisant
17	10	100	Satisfaisant

Le matériau supporte des refroidissements extrêmement rapides, plus rapides même que lors de la cuisson de biscuit (§ 5.21). On adoptera la vitesse $V'_c = 110\ ^\circ\text{C}/\text{min}$. correspondant à un temps de refroidissement de 10 minutes.

5.224. Courbe résultante de cuisson

En résumé, les caractéristiques de la courbe minimale sont les suivantes :

Intervalle de température °C	Vitesse °C/min.	Temps min.
T_0 à $1\ 120$	45	25
$1\ 120$ à 100	100	10
Total	-	35

Elles sont représentées schématiquement sur la figure 2 de la planche 38.

En conclusion, le cycle de cuisson d'une assiette de faïence émaillée peut être réduit à 35 minutes environ et décomposé comme suit :

- chauffage de la température ambiante à 1 120 °C 25 minutes
- refroidissement de 1 120 à 100 °C 10 minutes

5.225. Evaluation des échanges thermiques

Nous avons figuré en annexe 21 les éléments de calcul des échanges thermiques instantanés à quatre niveaux de température (400, 700, 1 000 et 500 °C) au cours de la cuisson type 17. Nous rappelons dans le tableau ci-dessous les densités de flux échangé par convection et rayonnement (kcal/m²h) après répartition de l'erreur entre la convection et le rayonnement.

Température	400 °C	700 °C	1 000 °C	500 °C
Convection	5 305	10 140	15 455	- 9 910
Rayonnement	- 3 345	- 8 180	- 13 495	5 470
Total	1 960	1 960	1 960	- 4 440

5.3. Réduction des cycles du grès

5.31. Généralités sur le matériau

Origine : les carreaux traités sont fabriqués en grande série dans une manufacture céramique de l'Aisne. Ils sont destinés aux revêtements de sols ou de murs. Ils sont actuellement cuits à 1 250 °C dans des fours continus à dalles glissantes et à passages multiples. La longueur de ces fours est de 17 m et la durée du cycle de cuisson est de 48 heures.

Composition chimique :

Si O ₂	63,80
Al ₂ O ₃	22,96
Ti O ₂	1,28
Fe ₂ O ₃	0,88
Ca O	0,50
Mg O	0,52
K ₂ O	1,72
Na ₂ O	1,25
Li O ₂	traces
Perte au feu	6,55
Total	99,46

Caractéristiques physiques :

- dimensions : la forme et la dimension des échantillons sont représentées sur la figure 2 de la planche 36, ainsi que les supports et la position des thermocouples,
- couleur : jaune ,
- dilatation-retrait : leurs variations en fonction de la température sont représentées sur la figure 1 de la planche 40. Le faible retrait relatif qui apparaît vers 500 °C et l'important retrait absolu enregistré au-delà de 900 °C sont caractéristiques des argiles illitiques ou micacées (annexe 7 - § 6.2)
- masse unitaire : 0,210 kg,
- masse volumique apparente : 1 820 kg/m³,
- porosité ouverte : 25,0 % ,
- chaleur massique moyenne à 85 °C : 0,25 kcal/kg °C,
- diffusivité thermique moyenne à 55 °C : 1,6 x 10⁻³ m²/h ,
- conductivité thermique équivalente :
 - . de l'échantillon cru à 55 °C : 0,7 kcal/mh°C ,
 - . de l'échantillon vitrifié à 500 °C : 1,1 kcal/mh°C ,

- analyse thermique différentielle : planche 40 figure 2,
Le graphique indique que l'élimination endothermique de l'eau de constitution s'effectue entre 400 et 600 °C environ,
- facteur total d'émission à 300 °K : 0,80,
à 1300 °K : 0,40.

5.32. Détermination de la courbe de chauffage

- vitesse critique de chauffage V_c entre T_0 et 1250 °C

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultat
1	28	44	coeur noir

Un seul essai figure dans le tableau précédent, car aucun incident ne se produit lors du chauffage à vitesse constante la plus rapide permise par le four (44 °C/min.). L'échantillon présente toutefois un coeur noir, ce qui signifie que la combustion des matières organiques a été incomplète. On peut néanmoins penser que le temps de cuisson sera de l'ordre de trois quarts d'heure ; c'est donc pour une telle durée qu'il faut déterminer la température de cuisson T_c .

- température de cuisson T_c

n°	Température °C	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
2	1 200	42	28	retrait insuffis.
3	1 240	50	24	satisfaisant
4	1 260	45	28	trop de retrait

La température de cuisson T_c est donc de 1 240 °C, pour un temps de chauffage de l'ordre de trois quarts d'heure. Les essais ultérieurs seront donc conduits à 1 240 °C.

- combustion des matières organiques

Une première série d'essais consiste à rechercher l'élimination du coeur noir par simple allongement de la durée de cuisson, donc à déterminer V_0 entre T_0 et 1 240 °C.

n°	Temps min.	Vitesse °C/min.	Résultats
5	30	40	Epaisseur du coeur noir : 5 mm
6	35	35	Epaisseur du coeur noir : 3 mm
7	40	30	Satisfaisant

Si le coeur noir est effectivement éliminé lorsque la durée de cuisson est de 40 minutes, il faut néanmoins convenir que la teinte du carreau n'est pas satisfaisante. Alors qu'elle devrait être jaune, elle reste uniformément nuancée de gris. Deux hypothèses concernant les causes de cette anomalie peuvent être émises :

- la combustion des matières organiques n'a pas été poussée à terme, les produits d'une combustion incomplète restant diffus dans la texture du tesson et le teintant en gris,
- les phénomènes d'oxydo-réduction du fer présent dans l'argile, qui doivent normalement se dérouler, ont été perturbés par un refroidissement rapide. On a vu que l'oxyde de fer participait largement à conférer au tesson sa teinte définitive. (2ème partie, pages 19 et 23) Par ailleurs, on sait que la formation d'oxyde magnétique noir (Fe_3O_4) résulte de l'instabilité à haute température de l'oxyde ferrique rouge (Fe_2O_3) en présence de la moindre trace d'oxyde de carbone ou d'hydrogène (91). Ces gaz résultent de la dissociation du gaz carbonique et de la vapeur d'eau contenus dans les produits de combustion. On peut donc supposer que l'oxyde magnétique n'a pas eu le temps de se réoxyder au cours du refroidissement et de donner au tesson la teinte désirée.

Pour pouvoir éliminer la première de ces deux hypothèses, il faut s'assurer qu'un ralentissement sensible de la cuisson par l'exécution de pseudo-paliers d'oxydation n'apporte aucune amélioration de la teinte.

n°	Intervalle de température °C	Temps heure	Vitesse °C/min.	Résultats
8	500 à 650	1	2,5	couleur incorrecte
9	500 à 650	2	1,2	couleur incorrecte
10	600 à 750	4	0,6	couleur incorrecte

La teinte des trois échantillons traités reste identique et incorrecte. Il faut donc supposer que seule la deuxième hypothèse est valable. Elle sera vérifiée au cours de la détermination de la courbe de refroidissement. Considérant que la combustion des matières organiques est complète pour un temps de cuisson de 40 minutes (essai n° 7), on adoptera par mesure de sécurité un temps de 50 minutes correspondant à une vitesse $V_0 = 25$ °C/min. appliquée de T_0 à 1 240 °C

5.33. Détermination de la courbe de refroidissement

- vitesse critique de refroidissement V'_C de 1 240 à 100 °C

n°	Temps minutes	Vitesse °C/min.	Résultats
11	15,0	75	aucune rupture
12	9,5	120	aucune rupture

Le matériau tolère des refroidissements très rapides sans se casser. On prendra $V'_C = 120$ °C/min.; néanmoins, la couleur des échantillons est incorrecte, comme il fallait s'y attendre. Il faut donc les refroidir plus lentement dans un intervalle de température qui reste à déterminer.

- borne inférieure de l'intervalle : T'_2

On la détermine en effectuant plusieurs essais dont le refroidissement est contrôlé de T_C à des températures T'_i , T'_j , T'_k , etc ... différentes ; la durée des refroidissements sera toutefois constante et égale à 1 heure environ.

n°	Intervalle de température °C	Temps h-min.	Vitesse °C/min.	Résultats
13	1 240 à 900	1 h 00	55	couleurs incorrect.
14	1 240 à 700	1 h 02	85	mais en progression
15	1 240 à 500	1 h 00	125	des essais 13 à 15

Cette série d'essais n'a pas été conduite jusqu'à des températures inférieures à 500 °C, car on estime que les vitesses de réaction deviendraient alors trop faibles pour permettre toute réoxydation de l'oxyde magnétique. On retiendra donc $T'_2 = 500$ °C pour borne inférieure.

- borne supérieure de l'intervalle : T'_1

On la détermine en effectuant des essais dont le refroidissement est contrôlé de 1 100, 1 000, 900, etc ... à 500 °C. Sa durée est toujours arbitrairement d'une heure environ. En dehors de ces intervalles de température, le refroidissement est effectué :

- de 1 240 à 1 100 °C, à la vitesse $V'_1 = 35$ °C/min,
- de 500 à 100 °C, à la vitesse $V'_3 = 65$ °C/min.

n°	Intervalle de température °C	Temps h - min.	Vitesse °C/min.	Résultats
15	1 240 à 500	1 h 00	12	couleurs incorrect.
16	1 100 à 500	1 h 00	10	mais :
17	1 000 à 500	1 h 01	8	- en progression de l'essai 15 à l'essai 16
18	900 à 500	1 h 01	7	- en régression de l'essai 16 à l'essai 19
19	700 à 500	0 h 56	3	

La borne supérieure à retenir est donc $T'_1 = 1 100$ °C. L'intervalle de température dans lequel les réactions de réoxydation s'affectuent le plus complètement est compris entre 1 100 et 500 °C. Il reste à déterminer la durée du refroidissement, qu'il faut appliquer à cet intervalle pour obtenir le meilleur résultat.

- vitesse V'_2 de 1 100 à 500 °C

n°	Temps heure	Vitesse °C/min.	Résultats
16	1	10,0	couleurs incorrectes mais en progression de l'essai 16 aux essais 20 et 21
20	2	5,0	
21	4	2,5	
22	8	1,2	satisfaisant

L'essai 22 est considéré comme satisfaisant sous deux réserves mineures :

- si la teinte de fond est rigoureusement identique à celle que l'on obtient par cuisson conventionnelle, la nuance du granité est très légèrement différente : le jaune est moins franc. Nul doute qu'une faible modification de la composition des oxydes colorants pourrait corriger les résultats. La recherche de cet artifice sort toutefois du cadre de cette étude.
- au toucher, la surface des carreaux traités en cuisson rapide est moins lisse que celle des carreaux obtenue par cuisson conventionnelle. Cette originalité peut présenter un avantage pour les revêtements de sol.

Il résulte du tableau précédent que la durée du refroidissement de 1 100 à 500 °C doit être au moins égale à 8 heures ; la vitesse correspondante est $V'_2 = 1,2$ °C/min. Si le matériau résiste au choc thermique d'un refroidissement rapide (essai 12), il exige, pour l'obtention d'une teinte satisfaisante, que l'allure en soit réduite sensiblement entre 1 100 et 500 °C.

5.34. Courbe résultante de cuisson

La courbe de cuisson se décompose comme suit :

Intervalle de température °C		Vitesse °C/min.	Temps h - min.
T_0	à 1 240	25	0 h 50
1 240	à 1 100	35	0 h 04
1 100	à 500	1	8 h 00
500	à 100	65	0 h 06
Total		-	9 h 00

Elle a été représentée schématiquement sur la figure 3 de la planche 38.

La durée des cycles de cuisson des carreaux de grès peut être réduite à 9 heures et décomposée comme suit :

- chauffage de la température ambiante à 1240 °C : 50 minutes,
- refroidissement de 1 240 à 100 °C : 8 heures 10 minutes.

Il faut donc reconnaître que le carreau de grès ne présente pas d'aptitude à la cuisson rapide. Une cuisson unitaire dont la durée est de 9 heures n'offre pas grand intérêt en raison des dimensions que devraient présenter les fours industriels (cf. § 6.7 de la conclusion générale et annexe 24).

5.35. Evaluation des échanges thermiques

Nous avons figuré en annexe 22 les éléments de calcul des échanges thermiques instantanés à quatre niveaux de température (700, 1 150, 800 et 400 °C) au cours de la cuisson type n° 22. Nous rappelons, dans le tableau ci-après, les densités de flux échangé par convection et par rayonnement (kcal/m²h) après équipartition de l'erreur entre la convection et le rayonnement.

Température	700 °C	1 150 °C	800 °C	400 °C
Convection	22 825	- 21 600	- 7 175	- 38 025
Rayonnement	- 19 825	17 400	7 025	30 225
Total	3 000	- 4 200	150	- 7 800

CHAPITRE VI

Conclusions Générales

6. CONCLUSIONS GENERALES

Au terme de cette étude, il paraît intéressant d'en rappeler les principaux chapitres :

En cours de cuisson, la chaleur transmise et l'atmosphère environnante provoquent des réactions physiques et chimiques sur les composants du matériau céramique, qui ne s'effectuent correctement que dans certaines conditions. C'est ainsi que les gaz de combustion déterminent la technique de cuisson en cazettes ou à feu nu. Le remplacement des combustibles traditionnels (charbon, bois, fuel) par des énergies modernes (gaz, électricité) a entraîné une évolution de la technique de chauffe vers la cuisson unitaire, en rendant possible la réduction des cycles de cuisson et nécessaire le calcul des échanges thermiques. Pour connaître les aptitudes du matériau céramique à la cuisson rapide, il fallait disposer d'un four expérimental intermittent, simulateur de cycles de cuisson accélérée, tels qu'ils pourraient s'effectuer dans l'industrie en fours continus (fours à passage). La recherche des cycles les plus courts acceptables par différents produits de terre cuite, de faïence et de grès, et l'évaluation des échanges thermiques correspondants, a permis d'établir le bilan des transferts par convection et par rayonnement, à différentes températures.

6.1. Produit céramique

On a vu qu'il devait présenter certaines qualités de vitrification, de texture, de couleur, de translucidité le cas échéant, de résistance thermique, mécanique et électrique. Elles s'obtiennent par action de la chaleur sur un mélange de matières argileuses, dégraissantes et fusibles.

Encore faut-il que cette action réponde à certaines conditions. Elle doit être :

- progressive, pour permettre aux différentes réactions chimiques telles que :

- . la combustion des matières organiques,
- . la déshydratation des minéraux,
- . la décomposition des carbonates,
- . la vitrification des fondants,

de s'effectuer en temps voulu,

- homogène, pour que les dégagements gazeux, les dilatations et les retraits qu'engendrent les réactions soient, à un instant donné, les mêmes en tous les points du matériau,

- complétée par l'action d'une atmosphère contrôlée, exempte d'impuretés telles que les cendres, les suies et le soufre. Ces impuretés sont, en effet, susceptibles de provoquer, au contact du matériau céramique en cours de cuisson, des réactions chimiques indésirables.

Il est donc normal que la technique de cuisson soit conditionnée par la nature du combustible, générateur de cette atmosphère.

6.2. Evolution de la technique de cuisson

Tant que les seuls combustibles industriels étaient le bois, le charbon et le fuel, il fallait protéger le produit céramique de l'action directe des fumées chargées d'impuretés par l'interposition d'un écran (cazette ou moufle). La présence de cet écran diminue les échanges thermiques par convection et par rayonnement. Les cycles de cuisson étaient par conséquent de longue durée. Pour assurer, néanmoins, la production requise, les fours étaient de forte capacité, ce qui allongeait encore la durée des cycles et alourdissait les charges d'exploitation.

L'apparition de nouvelles sources d'énergie sur le marché permit de s'affranchir de la sujétion de l'écran. En effet, l'électricité et le gaz n'émettent ni cendre, ni suie, ni soufre. La cuisson à feu nu favorise les échanges thermiques, réduit la durée des cycles et allège les charges d'exploitation. La technique tend alors vers la cuisson unitaire. Elle incite à étudier les possibilités de cuisson rapide et à évaluer les échanges thermiques suivant ainsi une évolution déjà enregistrée dans le domaine de la métallurgie.

6.3. Produits traités et four expérimental

Les produits traités ont été choisis en fonction, précisément, des perspectives de développement de leur cuisson rapide et unitaire en grande série, et en complément des produits traités en 1964 dans un four à passage (45). Les matériaux suivants ont été retenus :

- terre cuite : carreaux et briques,
- faïence : assiettes (cuisson de biscuit et cuisson d'émail),
- grès cérame : carreaux.

Pour entreprendre les essais, il a fallu construire un four expérimental. On a exposé les raisons pour lesquelles un four intermittent a été prévu, plutôt qu'un four continu. Ce four devait toutefois permettre de simuler toutes les conditions d'un four continu de cuisson unitaire (four à passage). Il devait ainsi satisfaire à certaines exigences relatives, notamment :

- à son exploitation (automaticité, sécurité),
- aux échanges thermiques (température de cuisson élevée, inertie réduite, convection forcée, rayonnement intense, charge thermique volumique élevée).

L'expérience a prouvé que toutes ces exigences ont été pleinement satisfaites, à l'exception de l'une d'entre elles : le rayonnement. En effet, malgré :

- la faible diffusivité du revêtement réfractaire intérieur ($3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$),
- la faible conductivité des parois ($0.2 \text{ kcal}/\text{mh } ^\circ\text{C}$),

le niveau et la distribution de leur température ont donné un bilan négatif des échanges par rayonnement. Pendant la période de chauffage, les échantillons ont toujours subi des déperditions, au lieu de bénéficier d'apport de chaleur par rayonnement. La rapidité des cycles pratiques n'a pas permis aux parois d'atteindre en moyenne une température supérieure à celle des échantillons traités.

6.4.Considérations théoriques

Pour mettre en équation les phénomènes de diffusion et d'échange thermique qui se produisent au cours d'une cuisson céramique, il faut, au préalable, énoncer une série d'hypothèses simplificatrices. Elles concernent principalement :

- le matériau traité : on suppose que ses dimensions, sa masse volumique et sa chaleur massique sont constantes ; que sa conductivité thermique équivalente décroît linéairement de la température ambiante à la température de vitrification ; que la température de l'échantillon est uniforme et égale à la température mesurée en son centre,
- les échanges de chaleur par convection : on a admis que les caractéristiques physiques du fluide chauffant (mélange d'azote, de vapeur d'eau, d'anhydride et d'oxyde de carbone) sont analogues à celles de l'air à la même température ; on suppose homogène la vitesse de circulation du fluide dans le four autour de l'échantillon. Le nombre de Reynolds est, en effet, compris entre 2.000 et 160.000,
- les échanges de chaleur par rayonnement : on suppose la loi de Lambert vérifiée, la formule de Bouguer applicable, les facteurs d'émission monochromatiques indépendants de la température et l'état de surface de l'échantillon peu influent.

On a pu alors déterminer :

- la solution fondamentale de l'équation de la diffusion de la chaleur appliquée aux échantillons plans dont la température superficielle imposée varie en fonction du temps suivant la loi $T = T_0 + \alpha t$:

$$T(x, t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha C}{\pi} \sin \frac{\pi x}{1} \left(1 - e^{-\frac{t}{C}}\right)$$

Les symboles ont été définis au § 4.22 du quatrième chapitre. Dans les conditions des essais, l'écart maximal de température entre la "peau" et le "cœur" de l'échantillon est de l'ordre de 10°C .

- le bilan des échanges thermiques à un instant donné en négligeant les échanges par conduction :

$$q_t = q_c - q_r$$

- q_t est la densité de flux de chaleur totale transférée à l'échantillon ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$),
- q_c est la densité de flux de chaleur transférée par convection ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$).

Cette valeur s'évalue par l'intermédiaire des nombres de Nusselt, Reynolds et Prandtl qui vérifient la relation expérimentale :

$$\text{Nu} = 0.323 \text{ Re}^{\frac{1}{2}} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}}$$

- q_r est la densité de flux de chaleur perdue par rayonnement ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}$).

Cette valeur se calcule par la formule :

$$\alpha_r = \frac{\epsilon_1 \sigma}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)} \left[(1 - \epsilon)\epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) + \epsilon(T_1^4 - T^4) \right]$$

Les symboles sont définis au § 4.233. de la 4ème partie.

6.5. Expérimentation

Cinq types d'échantillons différents ont été expérimentés. Pour arriver aux conclusions du paragraphe suivant, il a fallu :

- fractionner la courbe $T(t)$ de chauffage et de refroidissement en 2, 3 ou 4 segments de droite,
- surmonter un certain nombre de difficultés telles que :
 - . la tendance au ralentissement du chauffage à haute température,
 - . l'impact des produits de combustion sur les bords de l'échantillon,
 - . la sortie de la combustion des brûleurs tunnels en fonctionnement à débit élevé et en excès d'air,
 - . l'inertie et le temps de réponse de la régulation discontinue à trois positions, qui ne permettent pas de suivre rigoureusement la température du programme,
 - . la dissymétrie de chauffage due au jeu simultané de l'inversion de sens et de la régulation de température.

6.6. Résultats

Pour chaque produit céramique expérimenté, cette étude a permis d'établir des résultats de deux ordres différents. Les uns concernent la fonction $T(t)$, liant la température au temps des cuissons les plus rapides possibles, les autres les densités de flux de chaleur transférée correspondantes.

6.61. température et durée des cycles

Les conditions actuelles de cuisson pratiquées dans l'industrie céramique et les conditions de cuisson rapides sont confrontées dans le tableau ci-après :

		Terre cuite		Faïence		Grès
		carreaux	briques	assiettes	assiettes	carreaux
		monocuisson	monocuisson	biscuit	émail	monocuisson
Conditions actuelles	Température	1050 °C	950 °C	1260 °C	1100 °C	1250 °C
	Durée du cycle	15 heures	28 heures	20 heures	15 heures	48 heures
Résultats obtenus	Température	1080 °C	950 °C	1260 °C	1120 °C	1240 °C
	Durée du cycle	1 h 10 min.	3 h 25 min.	0 h 30 min.	0 h 35 min.	9 heures

Ce tableau met en évidence qu'en cuisson unitaire à feu nu :

- . les températures finales sont identiques ou légèrement supérieures (de 20 à 30 °C) aux températures de cuisson traditionnelle,
- . les durées de cycle sont, par contre, sensiblement inférieures ; elles sont réduites dans les rapports extrêmes de 5 à 1 pour le carreau de grès et de 40 à 1 pour l'assiette de faïence (cuisson de biscuit).

...

De même que les argiles de terre cuite ont été classées en fonction de leur aptitude au séchage rapide (92), tous les produits céramiques pourraient être classés en fonction de leurs possibilités de cuisson rapide. Le four expérimental conviendrait parfaitement pour établir ce classement, les résultats obtenus précédemment en constituant les points cardinaux.

Les courbes optimales de cuisson ont été représentées sur les planches 34 et 38.

6.62. densités de flux de chaleur

Pour chacune des cuissons types représentées par ces courbes, le bilan des échanges thermiques par convection et rayonnement a été établi à quatre niveaux de température différents (annexes 18 à 22). La précision avec laquelle l'équation précédemment définie :

$$q_t = q_c - q_r$$

a été vérifiée, est de 33% en moyenne. Cette précision étant sans commune mesure avec celle des appareils utilisés, elle se justifie par le caractère très simplificateur des hypothèses de calcul et par la multitude des facteurs interférant dans les conditions expérimentales elles-mêmes.

Nous avons regroupé les valeurs de q_t - la densité de flux de chaleur totale transférée à l'échantillon - dans le tableau ci-après ($\text{kcal/m}^2\text{h}$) :

	Température °C	Terre cuite		Faïence		Grès
		carreaux	briques	assiettes	assiettes	carreaux
		monocuisson	monocuisson	biscuit	émail	monocuisson
Chauffage	400	3200 ^c	2340 ^c	7700 ^d	1960	
	700	370 ^a	160 ^a	7700 ^d	1960	3000
	1000	6260 ^c	700 ^b		1960 ^b	
	1100			1660 ^c		
Refroidissement	1150					4200
	800					150 ^a
	500	15300 ^d	5800 ^c	4150 ^c	4440 ^c	7800 ^d
	400					

Les valeurs limites ont été affectées d'un indice rappelant la contrainte qui les déterminent :

- a - oxydation ou réduction des constituants,
- b - dissociation des composants,
- c - déformation, fissuration ou rupture des échantillons,
- d - puissance maximale du four.

...

L'examen de ce tableau permet d'établir un "spectre des densités de flux" correspondant à ces contraintes :

- bande a : 100 à 500 kcal/m²h,
- bande b : 500 à 2000 kcal/m²h,
- bande c : 2000 à 7000 kcal/m²h,
- bande d : 7000 à 15000 kcal/m²h.

Toutefois, notons que cette représentation analogique n'est qu'approximative. Elle ne doit ni dissimuler la véritable complexité des phénomènes physiques et chimiques de la cuisson, ni conduire à une généralisation hasardeuse.

6.7. Application des résultats à l'élaboration du projet d'un four à passage industriel

Le constructeur, qui entreprend l'étude d'un four, doit connaître la production P (kg/h) et la température de cuisson. A partir de ces données, il lui faut :

- fixer à priori d : la densité de chargement volumique (kg/m³), surfacique (kg/m²) ou linéique (kg/m),
- estimer t : la durée du cycle (h),
- calculer l : le volume (m³), la surface de la sole (m²) ou la longueur (m) du four par la formule :

$$P \times t = d \times l$$

qui se démontre aisément.

Jusqu'alors, t était évalué compte tenu de l'expérience, en fonction notamment de d.

L'étude entreprise a permis de déterminer la durée minimale du cycle de cuisson unitaire de produits céramiques de terre cuite, de faïence et de grès cérame, soit : la valeur de t figurant dans l'équation précédente, appliquée à un four à passage de cuisson unitaire (produits non empilés).

La formule peut se mettre sous la forme d'un abaque par points alignés représenté sur la planche 41 (93). Des exemples d'utilisation des résultats de cette étude pour le calcul de fours à passage sont donnés en annexe 24. A la lecture de cette annexe, on constate que, malgré de faibles sections de passage (0,04 à 0,20 m²), la longueur des fours reste dans des limites raisonnables pour la terre cuite et la faïence (13 à 33 m). Le prix de revient de ces fours serait donc inférieur à celui des fours traditionnels, qui sont de plus large gabarit et de plus grande longueur.

On peut également situer approximativement la position des brûleurs par rapport aux extrémités du four à passage. En effet, la vitesse de cheminement des produits étant constante de leur enfournement à leur défournement, les longueurs des zones de chauffage et de refroidissement sont proportionnelles, respectivement, aux temps de chauffage et de refroidissement. Dans certains cas comme la terre cuite, la zone de refroidissement peut être extrêmement courte.

Bien entendu, la transposition à l'échelle industrielle des résultats obtenus suppose que les conditions d'échange thermique sont analogues à celles du four expérimental, ou tout au moins, qu'elles leur seront équivalentes. Il importe donc de pouvoir soumettre le matériau céramique à une densité de flux q_t identique à celle qui a été calculée dans chaque cas. Il faut ainsi tenir compte d'une différence importante entre le four expérimental et le four industriel. Dans le premier cas, les échanges de chaleur par rayonnement q_r furent déficitaires ou négatifs pour le matériau à cuire. Ils seront bénéficiaires ou positifs dans le second. En effet, dans un four en fonctionnement permanent comme un four à passage, les parois internes sont portées à une température supérieure à celles des produits traités dans la zone de chauffe, et à une température inférieure dans la zone de refroidissement. La quantité de chaleur à transférer par convection q_c est donc réduite d'autant suivant l'équation déjà mentionnée :

$$q_c = q_t - q_r$$

Notons enfin qu'il faut émettre d'autres réserves au moins aussi importantes pour tous les problèmes que poseront nécessairement les supports (plaques et rouleaux par exemple), devant assurer le cheminement des produits à l'intérieur du four, notamment dans la zone de chauffe.

* *
*

Nous nous étions fixé pour objectif de connaître les possibilités de cuisson rapide et unitaire des matériaux céramiques et de chiffrer les échanges thermiques correspondants. Nous espérons avoir apporté par ce travail une contribution à l'étude de la réduction des cycles de cuisson des produits céramiques et ouvert une voie possible au développement industriel de cette technique.

...

Bibliographie

- 1 - M. Haussonne - Technologie céramique - Faïences, porcelaines J.B. Baillières et Fils 1954
pp 284 à 373
- 2 - P. Brémond - Produits céramiques fins - Techniques de l'Ingénieur 9 - 1956 - pp A 2120 - 11 à 14
- 3 - V. Bodin - Technologie des produits de terre cuite - Gauthier - Villars - 1956 - pp 123 à 130
- 4 - M. W. Thring - The Science of Flames and Furnaces - Chapman and Hall Ltd - pp 279 à 395
- 5 - E. Rowden et A.W. Norris - Fuel and productivity in the ceramic industries - Institute of Fuel
London - Congress 1963 - pp D 1 à 7
- 6 - M. Stoddard - Tunnel kilns - Ceramics fév.-63 - pp 12 à 19 - Trad. S.F.C. 4.402
- 7 - J. Ferré - Evolution de la cuisson des produits céramiques en fours électriques - Bulletin
Société Française de Céramique n° 43 - juin 59 - pp 85 à 95
- 8 - Présentation à Limoges d'un four tunnel unique en Europe - La Céramique Moderne n° 48 - mars 64
et n° 49 - avril 64
- 9 - Inauguration d'une nouvelle installation moderne de cuisson à la Poterie Pimprenelle -
L'Industrie Céramique - n° 613 - décembre 58 - p 767
- 10 - Inauguration d'une nouvelle installation de fabrication de tomettes - l'Industrie Céramique
n° 585 - mai 66 - pp 437, 438
- 11 - A. de Paoli - Fours continus à passages à dalles glissantes et leurs applications dans
l'industrie céramique - l'Industrie Céramique n° 583 - mars 66 - pp 212 à 218
- 12 - New type tunnel kiln - Ceramics-juin 64 - pp 20 à 24
- 13 - Trent tableware kiln - Ceramics - janv. 67 - pp 10 à 14
- 14 - Dr Buchkremer - Zur Entwicklung im keramischen Ofenbau zu Automation und Schnellbrand -
Sprechsaal für Keramik, Glas, Email Silikate - Heft 20 - 1965 - pp 699 à 701
- 15 - K. Davis, K. Manuel - The development of the Trent Kiln for firing glost tableware - Intercceram
n° 16 - décembre 1967 - pp 279 à 283
- 16 - P. Marinier - Nouvelle utilisation des fours électriques à passages multiples - l'Industrie
Céramique n° 583 - mars 1966 - pp 206 à 212
- 17 - M. Saino - Roller hearth kiln fires in 20 minutes - Ceramic Industry Magazine - août 1964 -
pp 44, 45, 46, 47, 58
- 18 - A.C. Allen - Roller hearth kiln fires in 20 minutes - Ceramic Industry Magazine - mai 65
pp 50, 51, 52, 77
- 19 - Gibbons - Roller hearth kiln for light ceramics - Claycraft and Structural Ceramics - mars 67
p 204
- 20 - Roller hearth kiln for ceramic industry - Industrial Gas - août 67 - p 129
- 21 - Large outputs on small cycles - Ceramics - mars 67 - p 18
- 22 - G.B. Margola - Description d'une unité moderne de production d'assiettes - l'Industrie
Céramique n° 599 - Septembre 67 - pp 703 à 706
- 23 - G.B. Margola - Fours modernes pour fabriques céramiques modernes - l'Industrie Céramique
n° 608 - juin/juillet 68 - pp 487 - 488
- 24 - Shenango China scores major break through in high speed automation - Ceramic Industry
août 61 - pp 48 à 51
- 25 - Shenango decorates glazes and fires in 100 minutes - Ceramic Industry Magazine - sept. 61
pp 104 à 107 - Trad. S.F.C. 3765

- 20 - Fast firing stirs industry action - Ceramic Industry Magazine - avril 63 - pp 103 à 110 et 128
- 21 - W. Schlegel - Méthodes et installations nouvelles pour la fabrication de carreaux - l'Industrie Céramique n° 601 - nov. 67 - pp 966 à 970
- 22 - K. Grosskop - Glasiertes Kleinmosaik aus dem Bandofen - Keramische Zeitschrift - avril 65
p 242 - Trad. S.F.C. 5285
- 23 - H. Gatske - Développement de la cuisson rapide des carreaux de revêtement et autres produits céramiques - l'Industrie Céramique n° 592 - janv. 67 - pp 43 à 46
- 24 - J. J. Svec - Why the tile industry is going to fast firing - Ceramic Industry Magazine - août 65
pp 50, 51, 52, 53, 54
- 31 - Means of speeding up firing processes - The British Clayworker - déc. 66 - pp 403 - 404
- 32 - W. H. Holmes et A. W. Norris - Developments in ceramic firing - Institute of Fuel - Bruxelles - Congress 1964 - pp 10.1 à 12
- 33 - F. Hermans - Une technique nouvelle de l'emploi du gaz en verrerie et en céramique - Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 60 - pp 880 à 893
- 34 - R. J. Reed - Burners for faster firing - American Ceramic Society - Bulletin mars 62 - vol. 40 - n° 3 - pp 166, 167 et 170
- 35 - J.P. Liotier - Quelques aspects techniques et pratiques de l'emploi des gaz de pétrole liquéfiés dans l'industrie, en particulier dans la métallurgie et la céramique - Bulletins de l'Association Française des Techniciens du Pétrole n° 144 - nov. 60 - pp 1007 - 1040 et n° 145 - janv. 61 - pp 75 - 113
- 36 - C. Ridé - Mise au point de la technique de cuisson de poterie émaillée - l'Industrie Céramique n° 605 - mars 68 - pp 213 à 217
- 37 - C. Ridé - Nouvelle application du propane en céramique : cuisson de grès d'Alsace au sel Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 66 - pp 855 - 890
- 38 - P. Gatzke - The problem of small tunnel kilns - Ceramics - nov. 64 - vol. 15 n° 489 - p 1
Trad. S.F.C. 5062
- 39 - F. Lechner - Prévision d'évolution des produits de céramique du bâtiment - l'Industrie Céramique n° 601 - nov. 67 - pp 935 - 939
- 40 - J. Coudamy - Les fours intermittents à gaz pour cuisson de céramique - Revue générale de Thermique n° 6 - juin 62 - pp 41 à 48
- 41 - Inauguration d'un nouveau four aux Ets Bernardaud de Limoges - l'Industrie Céramique n° 589 - oct. 66 - p 855
- 42 - M. de Jerphanion - Emploi du gaz naturel dans l'industrie de la porcelaine - Silicates Industriels juillet/août 66 - pp 293 - 303
- 43 - R. Prévot et J. Allain - Le gaz dans l'industrie de la céramique : la cuisson de la porcelaine - Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 56 - pp 978 - 1032
- 44 - Brevet d'invention 1.223.948 demandé le 28.12.60 à Paris - transporteur pour four tunnel
- 45 - C. Ridé - Réduction des cycles de cuisson de produits céramiques fins à l'aide d'un four à passage expérimental alimenté au propane. Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 64 - pp 855 à 890
- 46 - F. Hermans - Une technique nouvelle dans le chauffage des fours industriels - Gaswärme - sept. 61 pp 291 à 295
- 47 - Patent specification 990.589 demandé le 8.10.63 à Londres - Improvements relating to kilns and the like
- 48 - R.J. Brocard - La poterie dans ce four tunnel se déplace sur coussin d'air - L'Usine Nouvelle n° 48 - 21 novembre 68 - p 136
- 49 - Brevet d'invention 1.435.634 demandé à Paris le 4.6.65 - Four à barres de levée ou à pas de pèlerin pour l'industrie céramique chauffé électriquement

- 50 - D. Buchkremer - Automation et cuisson rapide dans l'industrie céramique - l'Industrie Céramique n° 588 - sept. 66 - pp 728 à 730
- 51 - Fours à cuisson rapide pour l'industrie céramique - l'Industrie Céramique n° 596 - mai 67 - p 434
- 52 - J.A. Peterson - Versatile kiln aids fast firing research - Ceramic Age n° 80 - nov. 64 - pp 28 à 30
- 53 - Brevet d'invention 1.447.505 demandé le 5.7.65 à Paris : structures de four et procédés perfectionnés particulièrement destinés à la cuisson rapide d'objets en céramique
- 54 - N.A. Zakharikov - cuisson rapide des carreaux de revêtement. Steklo Keram n° 8 - août 64 pp 20 à 23
- 55 - W.L. German - Modern trends in firing - British Claywork n° 76 - Février 68 - pp 24, 26, 27 et 28
- 56 - C. Monnet - Contribution à l'étude des procédés de chauffe à hautes vitesses de transfert. Journées de la combustion et de la Conversion de l'Energie - Paris 64 - pp V 3-1 à 17
- 57 - J. Soulages et B. Ribadeau Dumas - Contribution au développement des procédés de chauffe à haute vitesse de transfert - Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 65 - pp 1199 - 1273
- 58 - G. Janneau - Les Arts du Feu - Que sais-je ? n° 45 - Presses Universitaires de France 1967 - page 5
- 59 - Confédération des Industries Céramiques de France - Annuaire 1967/1968 - pages 22 - 24
- 60 - INSEE - Tableaux de l'Economie Française 1966 - pages 189, 213 et 214
- 61 - J. Debras-Guedon - Une nouvelle méthode précise d'analyse des silico-alumineux - l'Industrie Céramique - n° 555 - septembre 1963 - pages 345 à 352
- 62 - C.A. Jouenne - Céramique générale - Notions de physico-chimie - Gauthier-Villars 1960 - Tome 1 pp 213 à 250
- 63 - Y. Letort - Produits réfractaires et isolants - CESSID 1967 - page 53 et pages 101 à 107
- 64 - P. Munier - Technologie des faïences - Gauthier-Villars 1957 - pages 114 à 125
- 65 - C. Ridé - Introduction à l'étude du séchage rapide des produits céramiques - Faculté des Sciences de Paris - Diplôme d'Etudes Approfondies d'Echanges Thermiques - juin 1967 - pages 2 à 19
- 66 - R.B. Bird, W.E. Stewart et E.N. Lightfoot - Transport Phenomena - John Wiley and Sons Inc. 1966 - pages 642 - 648
- 67 - H. Sirhal - Die technologischen Grundlagen zur Verkürzung der Brenndauer für Ziegelerzeugnisse - Actes du IXème Congrès Céramique - Bruxelles 1964 - pages 525 à 538
- 68 - W. Wanie - Reduzierendes Brennen - Die Ziegelindustrie - Heft 3 - 1967 - pages 89 à 95
- 69 - Y. Letort - Isolants thermiques - Produits réfractaires - Techniques de l'Ingénieur 5 - 1959 - A 2140 pages 1 à 4 - A 2142 pages 1 à 12 et A 2144 pages 1 à 3
- 70 - A. Nessi et J. Danckaert - Calorifuges - Techniques de l'Ingénieur 5 - 1959 - pages A 2130 - 2 et 3
- 71 - C. Demoulin et H. Prod'hon - Fumisterie Industrielle - Techniques de l'Ingénieur 5 - 1959 - page B 110 - 11
- 72 - G. Piltz - Besser Brennen nach der optimalen Brenncurve - Ziegelindustrie n° 19 - octobre 66 pp 757 à 760 - Traduction S.F.C. n° 5.747
- 73 - North Eastern Gas Board - High velocity heating - Flambeau - juin 1966 - pages 9 - 10
- 74 - R. Allegre - Rayonnement sélectif des réfractaires à haute température - Institut Français des Combustibles et de l'Energie 1961 - 2.02 page 5
- 75 - M. Olmer - Transfert de chaleur par rayonnement - Cours à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires - C.D.V. page 48
- 76 - J. Gérard et J. Mayssal - Fours à brûleurs radiants - Propriétés thermiques générales et application au chauffage des métaux ferreux - Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 1954 - pages 877 - 904

- 77 - Association Technique de l'Industrie du Gaz - Aide-mémoire de l'Industrie du Gaz - 1953 - pages 149 - 153.
- 78 - W. Schulle - Die Wärmeleitfähigkeit von feuchten, austrocknenden keramischen Massen - Die Ziegelindustrie 1963 - Heft 22 pp 839-844 - Trad. S.F.C. 4644.
- 79 - N.C. Majumdar - T.J. Stevens - Determination of apparent specific heat of clay - Journal of the Australian Ceramic Society - Vol. 2 n° 1 - avril 1966 pp8 à 14.
- 80 - J. Tuleff - Hétérogénéité thermique des produits céramiques au cours de leur cuisson - Bulletin de la Société Française de Céramique n° 30 - Janv./Mars 1956 pp 34 - 40.
- 81 - A. Mondiez - Cours de physique industrielle - Gauthier-Villars 1946 p 58.
- 82 - F. Cabannes - Détermination du facteur monochromatique d'émission d'une surface réfractaire à haute température - Bulletin de la Société Française de Céramique n° 48 - 1960, pp3 - 18.
- 83 - Z. Brisnik - Bestimmung der räumlich spektralen Strahlungseigenschaften (Reflexions - und Absorptionsvermögen) von Werkstoffen in Abhängigkeit von ihrer Temperatur. Electrowärme International Band 2 - n° 3 - mars 1968 pp 75 - 83.
- 84 - M. Michaud - Facteurs d'émission d'oxydes métalliques et réfractaires à haute température - Thèse Paris 1951.
- 85 - A. Gouffé - Transmission de la chaleur par rayonnement - Eyrolles et Gauthier-Villars 1968 - pp 103 - 116.
- 86 - M. Jakob et G.A. Hawkins - Elements of heat transfer - John Wilney and Sons pp 143 - 148.
- 87 - M. Penner - Symposium of quantitativ spectroscopy and radiativ transfert - p 23.
- 88 - W.H. Mc Adams - Transmission de la chaleur - Dunod 1950 - p 240 - 241 et 70 - 74.
- 89 - J. Tuleff - Le frittage - Description macroscopique des phénomènes - L'Industrie Céramique n°⁸ 609 - 610 août - septembre 1968 - pp 636 - 643
- 90 - H.S. Carslaw - J.C. Jaeger - Conduction of heat in solids - Oxford at the Clarendon Press 1967 - pp 105 - 109.
- 91 - P. Delbourg - Action des traces d'oxygène sur le recuit brillant de l'acier à bas carbone. Association Technique de l'Industrie du Gaz en France - Congrès 1964 - pp 826 à 853.
- 92 - L. Alviset - Méthode permettant de classer les argiles utilisées dans l'industrie des tuiles et briques en fonction de leur aptitude au séchage - Thèse Paris 1966.
- 93 - A. Giet - Abaques ou nomogrammes - Dunod 1965 - pp 107 à 111.
- 94 - D.P. Shelley - Progrès récents des fours céramiques - L'Industrie Céramique - n° 617 - Avril 1969 - pages 278 - 281.

Nomenclature des annexes

- 1 - Durées comparées des cycles
- 2 - Rendements thermiques comparés
- 3 - Bilan thermique d'un four cellule
- 4 - Fours à passage expérimentaux
- 5 - Conditions d'échanges thermiques - Conception du four expérimental - Idéogramme
- 6 - Four expérimental - Caractéristiques thermiques du laboratoire en régime permanent
- 7 - Défauts de cuisson
- 8 - Mesure de la chaleur massique par la méthode modifiée du calorimètre de Berthelot - Laboratoire d'Echanges Thermiques
- 9 - Valeurs de $\left[\frac{T}{100} \right]^4$ en $^{\circ}K^4$
- 10 - Mesure du facteur de réflexion hémisphérique monochromatique - Laboratoire de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée
- 11 - Mesure du coefficient de diffusivité thermique par la méthode du signal périodique - Laboratoire d'Echanges Thermiques
- 12 - Expérimentation sur carreau de terre cuite - Densités de flux - Bilans thermiques - Cuisson n° 28
- 13 - Expérimentation sur brique de terre cuite - Densités de flux - Bilans thermiques - Cuisson n° 14
- 14 - Expérimentation sur assiette de faïence - cuisson de biscuit - Densités de flux - Bilans thermiques - Cuisson n° 17
- 15 - Expérimentation sur assiettes de faïence - cuisson d'émail - Densités de flux - Bilans thermiques - Cuisson n° 17
- 16 - Expérimentation sur carreaux de grès - Densités de flux - Bilans thermiques - Cuisson n° 22
- 17 - Expérimentation - Principales caractéristiques physiques des matériaux traités
- 18 - Exemples de cuisson rapide en four à passage

Céramique	Nature des échantillons	Type de cuisson	Température (°C)	Durée des cycles			
				Four intermittents		Four continus	
				Technique			
				Traditionnelle	Moderne	Traditionnelle	Moderne
Terre cuite	Carreaux	biscuit	1050	1 mois	48 heures	40 heures	40 minutes
		émail	960	1 mois	24 heures	23 heures	40 minutes
	Carreaux	biscuit	1150	15 jours	-	80 heures	20 minutes
		émail	1050	15 jours	-	60 heures	20 minutes
Faïence	Vaisselle	biscuit	1200	10 jours	24 heures	25 heures	3 heures
		émail	1050	8 jours	24 heures	25 heures	6 heures
	Sanitaire	monocuisson	1200	15 jours	-	36 heures	11 heures
		monocuisson	1250	10 jours	48 heures	48 heures	-
Grès	Poterie	monocuisson	1220	15 jours	3 jours	-	-
		dégourdi	950	15 jours	24 heures	15 heures	-
Porcelaine	Vaisselle	émail	1390	15 jours	24 heures	24 heures	-
		décor	900	24 heures	24 heures	3 heures	-
	Isolateurs	monocuisson	1410	90 heures	22 heures	43 heures	-

Rendements thermiques comparés

	Four ancien (40)	Four moderne
Capacité (m ³)	50	4
Combustible	charbon	propane
Pouvoir calorifique inférieur (kcal/kg)	7 000	11 000
Consommation (kg)	9 000	340
Céramique traitée	porcelaine	porcelaine
Température de cuisson (°C)	1 380	1 380
Poids de céramique enfournée P _c (kg)	2 100	400
Poids des supports P _s (kg)	9 500	1 760
<u>Chaleur utile (kcal)</u>		
. Céramique $Q_{ce} = P_c \times 0.22 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times 1380^\circ\text{C}$	640 000	134 000
. Supports $Q_{se} = P_s \times 0.25 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times 1380^\circ\text{C}$	3 280 000	607 000
. Total $Q_{ce} + Q_{se}$	3 920 000	741 000
<u>Chaleur fournie (kcal)</u>	63 000 000	3 740 000
<u>Rendement</u>		
. brut r _b (%)	6.2	19.8
. net r _n (%)	1.0	3.6

Bilan thermique d'un four cellule (36)

Cuisson de poterie émaillée à 965°C	
Température initiale	10°C
Capacité du four	2 m ³
Chargement : 835 kg de poterie à 10 % d'humidité 260 kg de supports	
Taux d'encastage	1/1.2
Densité d'enfournement	420 kg/m ³
Consommation de propane	75 kg à 11 000 kcal/kg PCI

Chaleur utile

. échauffement et évaporation de l'eau de façonnage :	
0.10 x 835 kg x 630 kcal/kg	53 000 kcal
. échauffement de la poterie	
0.90 x 835 kg x 0.25 kcal/kg°C x (965 - 10)°C	178 925 kcal
. échauffement des supports	
260 kg x 0.25 kcal/kg°C x (965 - 10)°C	62 075 kcal
Total	294 000 kcal soit 36%
<u>Pertes par les fumées</u>	168 000 kcal soit 20%
<u>Pertes par capacité et flux calorifiques des parois</u>	363 000 kcal soit 44 %

Chaleur fournie

. 75 kg x 11 000 kcal/kg 825 000 kcal
soit 100 %

Rendements

. brut	294 000 : 825 000	36 %
. net	231 925 : 825 000	28 %

FOURS À RADIATION EXPÉRIMENTAUX

Type de four	Chauffage	Température (°C)	Dimensions du laboratoire (m)			Cycle	Références
			Largeur	Hauteur	Longueur		
à rouleaux	électricité ou gaz	900 à 1230	1.50	-	9.10	20 à 60 min.	18
à pas de pèlerin	gaz	780 à 1420	0.35	0.05	9.10	1 à 10 heures	44 - 45
à dalles glissantes	gaz	1250	0.65	0.50	8.00	-	46
à coussin d'air	électricité	1200	0.12	-	30.00	1 heure	47 - 48 - 54
à dalles glissantes	électricité	1050	-	-	3.00	17-60 min.	26
à pas de pèlerin	électricité	1300	-	-	26.00	20-60 min.	11 - 49
à dalles glissantes	électricité	1300	-	-	40.00	20-60 min.	50 - 51
à rouleaux	électricité	1150	0.07	0.25	-	7 min. - 30 heures	52
à voûte et fond mobiles	gaz	900 - 1100	-	-	-	-	53
à rouleaux	gaz	1250	0.25	-	3.80	15-25 min.	54

Industrie Céramique Française

Tableau économique

Pâte	Produits	Produits	Production : (60)		Chiffre d'affaires (60)		Valeur marchande moyenne	
			Unité	Quantité	Million de F	%	Unité	Quantité
Poreuse	Terre cuite	Tuiles, briques et hourdis	1 000 t	8 096	758	39.7	F/kg	0.10
		Poterie culinaire et horticoles	"	48	27	1.4	F/kg	0.56
		Produits réfractaires	"	642	311	16.3	F/kg	0.48
Compacte	Faïence	Carreaux	1 000 m ²	5 244	98	5.1	F/m ²	18.72
		Vaisselle et faïence d'art	1 000 t	44	127	6.7	F/kg	0.29
		Sanitaire	1 000 t	101	213	11.2	F/kg	2.11
	Grès	Carreaux et dalles	1 000 m ²	13 764	209	10.9	F/m ²	16.10
		Tuyaux et industrie chimique	1 000 t	68	40	2.1	F/kg	0.59
		Vaisselle et électrotechnique	1 000 m ³	171	125	6.6	F/l	0.73
		TOTAL						
						1 908	100.0	

Produits céramiques courants

Compositions centésimales types
(en % poids)

	Terre cuite ordinaire	Faïence fine feldspathique	Grès ordinaire	Porcelaine dure
Perte au feu	15.8	6.9	6.7	0.1
Silice totale	45.0	68.5	67.0	73.3
Alumine	14.4	20.2	19.7	21.5
Oxyde de titane	0.8	0.5	1.2	0.1
Oxyde de fer	5.1	0.6	1.9	0.3
Chaux	15.6	0.6	0.3	1.3
Magnésie	0.7	0.3	0.4	-
Oxyde de potassium	2.2	1.3	1.8	} 4.2
Oxyde de sodium	0.2	0.6	0.3	
Oxyde de lithium	-	-	-	
Total	99.8	99.5	99.3	100.8

Classification des silicates (62)

1. Structure en flot

Elle est encore dite à groupement $(\text{SiO})^{4-}$ indépendant, les tétraèdres de silice n'étant pas liés directement entre eux, mais indirectement par l'intermédiaire de polyèdres d'autres oxydes ; à ce type de structure appartiennent les orthosilicates. Exemple : la forstérite SiO_4Mg_2 (pl 4 fig. 1).

2. Structure en double tétraèdre

Deux tétraèdres de silice sont liés par un oxygène mis en commun pour former un groupement $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$. Les pyrosilicates sont ainsi constitués. Exemple : l'ackémanite $\text{Si}_2\text{O}_7\text{Ca}_2\text{Mg}$ (pl 4 fig. 2).

3. Structure cyclique

Plusieurs tétraèdres se lient en formant des anneaux et donnant les tri-, tétra-, et hexasilicates. Exemple : le béryl $(\text{Si}_6\text{O}_{18})\text{Al}_2\text{Be}_3$ (pl 4 fig. 3).

4. Structure en chaîne

Les tétraèdres placés de part et d'autre d'une même ligne sont liés par deux sommets et constituent la famille des métasilicates. Exemple : la wollastonite $(\text{SiO}_3)\text{Ca}$ (pl 5 fig. 1).

5. Structure en rubans (ou fibreuse)

Elle est formée par l'association latérale de deux chaînes de tétraèdres de silice correspondant à $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$. Exemple : minéraux argileux du type sépiolitique.

6. Structure en feuillets (ou phylliteuse)

Elle est obtenue par répétition infinie dans le plan de la structure précédente formant un réseau hexagonal (en couches) ou la superposition de ces couches (en feuillets). La formule générale est $(\text{Si}_2\text{O}_5)^{-}$ (pl 5 fig. 3). Les minéraux de ce type se classent en trois sous-groupes.

6.1 Sous-groupe du type kaolin : les feuillets élémentaires sont constitués par l'association d'une couche octaédrique Al^{+++} ou Mg^{++} sous-jacente à une couche hexagonale de tétraèdres de silice. Exemple : la kaolinite $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$. C'est une matière première de valeur qui doit sa plasticité à sa structure en feuillets.

6.2 Sous-groupe du type mica : les feuillets élémentaires sont formés de trois couches : une couche octaédrique Al^{+++} ou Mg^{++} prisonnière entre deux couches hexagonales de tétraèdres de silice. Exemple type : le talc $4\text{SiO}_2, 3\text{MgO}, \text{H}_2\text{O}$. Ce sous-groupe comporte 4 familles : les montmorillonites, les vermiculites, les illites et les micas.

6.3 Sous-groupe du type chlorite : la structure comprend 2 assises de magnésium alternées avec 2 assises de silice-alumine.

Produits réfractaires denses

Classification - Caractéristiques - Utilisations - types (63)

Dénomination		Teneur en élément principal	Caractéristiques			Utilisations-types
			Densité	Résistance pyroscop. °C	Conductivité thermique kcal/mh°C	
Produits alumineux	à haute teneur en alumine	$46 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_4$	2.1-2.9	1 770 à 1 880	1.0 - 2.6 à 500 °C	Cuves de fours de verrerie
	argileux	$32 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_4 < 46 \%$	1.7-2.3	1 670 à 1 770	0.7 - 1.1 à 500 °C	Fours de céramiques
	silico-argileux	$10 \% \leq \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_4 < 32 \%$	1.6-2.1	1 580 à 1 710	0.7 - 1.1 à 500 °C	Fours de gazéification
	de demi-silice	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 < 10 \% \text{ et } \text{SiO}_2 < 93 \%$	1.8-2.2	1 580 à 1 650	0.6 - 1.0 à 500 °C	Fours à coke
	de silice	$\text{SiO}_2 > 93 \%$	1.7-1.8	1 690 à 1 730	0.7 - 1.4 à 1 000°C	Piedroits four Martin (partie haute)
Produits basiques	magnésie	$\text{MgO} \geq 80 \%$	2.7-3.0	1 900	2.0 - 4.0 à 1 000°C	Piedroits fours Martin (partie basse)
	magnésie-chromite	$55 \% \leq \text{MgO} < 80 \%$	2.8-3.0	2 000	1.5 - 3.0 à 1 000°C	Fours métallurgiques
	Chromite-magnésie	$25 \% \leq \text{MgO} < 55 \%$	2.9-3.2	1 850	1.5 - 1.7 à 1 000°C	Fours métallurgiques
	chromite	$25 \% \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ et } \text{MgO} \leq 25 \%$	3.0-3.3	1 800	1.2 - 1.5 à 1 000°C	Piedroits fours Martin (partie intermédiaire)
	forstérite	Constituant principal : SiO_4Mg_2	2.6-2.8	1 800	1.2 - 1.4 à 1 000°C	Voutes fusion de cuivre
	dolomie	Constituant principal : $(\text{CO}_3)_2\text{MgCa}$	2.8-3.2	1 800	1.5 - 1.7 à 1 000°C	Convertisseur à oxygène
Produits spéciaux	carbone	$90 \% < \text{C}$	1.4-1.5	1 600	3 - 10 à 900 °C	Creusets hauts-fourneaux
	zircon	$60 \% < \text{ZrO}_2 < 64 \%$	3.2-3.5	1 650	1.5 - 1.8 à 1 000°C	Poches de coulée
	carbure de silicium	$50 \% < \text{CSi} < 97 \%$	2.3-2.8	1 850	3.5 - 13.0 à 1 000°C	Creusets, moufles

Produits réfractaires isolants alumineux

Caractéristiques moyennes (69)

Nature	Densité	Températ. limite d'emploi (°C)	Conductivité moyenne (kcal/mh°C) à :					
			250 °C	500 °C	750 °C	1000 °C	1250 °C	1500 °C
Argileux	0.4	1 250	0.11	0.14	0.17	0.21		
Argileux	0.5	1 250	0.13	0.18	0.24	0.30		
Argileux	0.6	1 300	0.16	0.22	0.30	0.38	0.48	
Argileux	0.7	1 350	0.20	0.27	0.36	0.45	0.55	
Argileux	0.8	1 450	0.24	0.32	0.40	0.50	0.60	0.70
Argileux	0.9	1 500	0.30	0.37	0.45	0.55	0.66	0.80
Argileux	1.0	1 500	0.34	0.43	0.55	0.66	0.78	0.90
Haute teneur en alumine	1.2	1 600	0.36	0.42	0.56	0.71	0.85	1.00

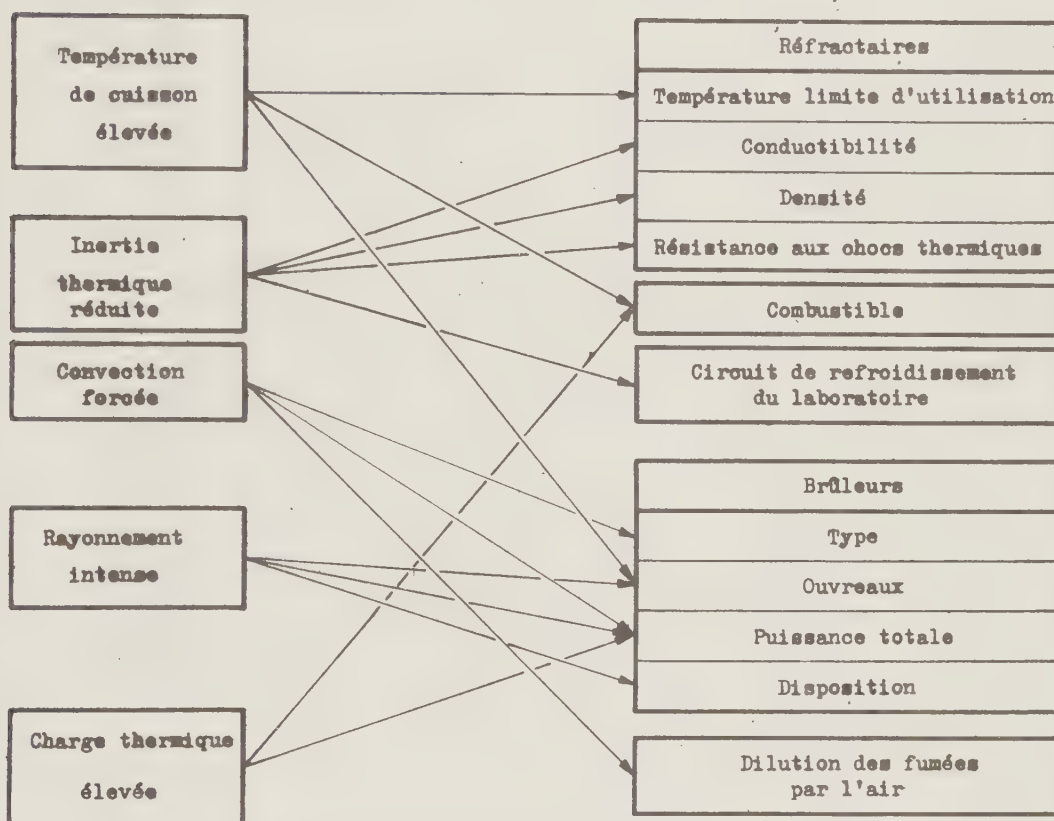
Produits calorifuges

Caractéristiques moyennes (63) (70)

Nature	Densité	Températ. limite d'emploi (°C)	Conductivité moyenne (kcal/mh°C) à :			
			25 °C	100 °C	300 °C	500 °C
Mousse de polystyrène	0.02	100	0.030			
Liège	0.13	100	0.033			
Carbonate de magnésie	0.20	300		0.05	0.06	
Laine miné- rale	0.15	650		0.05	0.07	0.09
Amiante	0.20	700		0.05	0.07	
Diatomite	0.20	800		0.06	0.07	0.08
Vermiculite	0.35	1 000	0.08			0.20

Conditions d'échanges thermiques - Conception du four expérimental

Idéogramme



Four expérimental

Caractéristiques thermiques du laboratoire en régime permanent

Paroi	Nature	Densité	Température lim.d'util. °C	Résistivité moyenne r mh°C/kcal	Epaisseur e m	r x e mh°C/kcal	$\sum \frac{1}{r \times e}$ kcal/m²h°C	Densité de flux kcal/h	Températures	
									Supérieure °C	Inférieure °C
Sole Epaisseur : 0,417 m	Feutre réfr.	0.38	1 500	5.90	0.007	0.041	0.420	570	1 400	1 380
	Brique isol.	1.25	1 600	1.56	0.094	0.147			1 380	1 290
	Dalle réfr.	2.00	1 400	0.90	0.062	0.056			1 790	1 260
	Lame d'air	-	-	5.77	0.062	0.357			1 260	1 060
	Brique isol.	0.50	1 260	7.70	0.124	0.960			1 060	510
	Brique cal.	0.45	1 100	13.40	0.062	0.830			500	40
Murs latéraux Epaisseur : 0.435 m	Feutre réfr.	0.38	1 500	5.90	0.007	0.041	0.395	535	1 400	1 380
	Brique isol.	1.25	1 600	1.56	0.110	0.172			1 380	1 290
	Lame d'air	-	-	5.70	0.060	0.342			1 290	1 100
	Brique isol.	0.50	1 260	7.70	0.111	0.855			1 100	640
	Brique cal.	0.60	1 000	6.25	0.111	0.694			640	270
	Produit cal.	0.28	750	14.30	0.030	0.430			270	40
Voûte Epaisseur : 0.323 m	Feutre réfr.	0.38	1 500	5.90	0.007	0.041	0.867	1 080	1 400	1 360
	Béton réfr.	2.10	1 450	0.90	0.124	0.112			1 360	1 230
	Lame d'air	-	-	8.95	0.062	0.550			1 030	640
	Dalle	1.90	1 350	1.00	0.062	0.062			640	570
	Brique cal.	0.60	1 000	6.25	0.062	0.388			570	150

Défauts de cuisson

A g e n t s	C a u s e s	E f f e t s
Eau de constitution	Elimination trop rapide, trop tardive Texture de pâte trop fine	Fissures, rupture, écaillage
Matières organiques	Combustion trop rapide, trop tardive	Boursoufflures, rupture
	Combustion incomplète	Coeur noir
Carbonates	Décomposition trop rapide, trop tardive	Boursoufflures, fissures, rupture
Quartz, cristobalite	Transformation cristalline trop rapide	Fissures, rupture
Vitrifiants	Température de cuisson trop faible	Vitrification insuffisante : . porosité trop élevée, . teinte incorrecte, . retrait insuffisant, . sonorité mauvaise.
	Température de cuisson trop élevée	Vitrification trop poussée : . porosité trop faible, . teinte incorrecte, . retrait surabondant
	Atmosphère inadéquate	Vitrification, teinte incorrecte, grésil.

Mesure de la chaleur massique par la méthode modifiée du calorimètre de Berthelot

Laboratoire d'Echanges Thermiques

1. Principe

La détermination de la chaleur massique d'un échantillon par la méthode traditionnelle du calorimètre de Berthelot consiste à mesurer l'échauffement de la masse en eau du calorimètre, provoqué par l'immersion de l'échantillon porté préalablement à une température uniforme et connue. Cette méthode s'accompagne malheureusement d'une erreur systématique par excès, due au refroidissement incontrôlé de l'échantillon au cours de son transfert de l'étuve ou du bain thermostaté au calorimètre. Cette erreur pourrait être éliminée, si la température initiale de l'échantillon était précisément égale à la température ambiante. Mais il faudrait alors que la température de l'eau du calorimètre et celle de son enceinte soient sensiblement inférieures à cette température, ce qui n'est pas très aisé à réaliser.

C'est pourquoi l'on fait appel à une méthode modifiée, qui consiste à mesurer le refroidissement de la masse en eau du calorimètre et de l'échantillon immergé par l'injection d'une quantité d'eau connue à température connue. Cette méthode peut, par conséquent, être appelée méthode du mélange.

2. Mode opératoire

Il consiste à déterminer successivement :

2.1 La valeur en eau du calorimètre

On mesure le refroidissement de Θ_i à Θ_f d'une masse définie d'eau M, dû à l'injection d'une autre quantité d'eau dont on connaît la masse μ et la température Θ_e .

Les masses sont déterminées à la balance et les températures au thermomètre à mercure. L'eau du calorimètre est agitée mécaniquement pour favoriser son homogénéité de température.

L'échange thermique entre M et μ étant pratiquement instantané, la température du mélange baisse continuellement. Pour déterminer Θ_f avec précision, il est par conséquent souhaitable de régler la température de l'eau contenue dans l'enceinte calorimétrique à une valeur légèrement supérieure à Θ_f . Il se produira donc, lorsque le mélange aura acquis sa température uniforme, un léger réchauffement. La température finale Θ_f correspond alors à la tangente horizontale de la courbe $\Theta(t)$.

2.2 Le refroidissement de T_i à T_f de la même quantité d'eau M et de l'échantillon m_0 après mélange avec une nouvelle quantité d'eau (m, T_e).

L'échange thermique entre l'échantillon et l'eau n'étant pas instantané, on enregistre un refroidissement rapide de l'eau du calorimètre consécutif à l'échange eau - eau, puis un réchauffement lent dû à l'échange eau - échantillon.

En conséquence, il est souhaitable de régler la température de l'eau de l'enceinte calorimétrique à une valeur légèrement inférieure à T_f . Cette température finale correspond alors à la tangente horizontale de la courbe $T(t)$.

3. Calculs

3.1 Valeur en eau μ_0 du calorimètre

Elle est donnée par la formule du bilan thermique : $\mu_0 (\Theta_i - \Theta_f) = \mu (\Theta_f - \Theta_e)$

3.2 Chaleur massique ρ de l'échantillon

La valeur résulte également d'un bilan thermique : $(\mu_0 + m_0 \rho) (T_i - T_f) = m (T_f - T_e)$

4. Correction

Pour tenir compte des pertes ou des gains thermiques du calorimètre en cours d'expérience, on retranche des écarts $(\Theta_i - \Theta_f)$ et $(T_i - T_f)$ la valeur C donnée par la formule :

$$C = n'D_1 + (n - n') D_2$$

dans laquelle :

n' est la durée de l'intervalle de temps compris entre l'injection de l'eau froide dans le calorimètre et l'instant où l'abaissement de température a atteint les 6/10 de l'abaissement total $(\Theta_i - \Theta_f)$ où $T_i - T_f$ (min), est la durée de l'expérience correspondant à l'abaissement total $(\Theta_i - \Theta_f)$ ou $T_i - T_f$ (min),

D_1 est le refroidissement moyen de l'eau du calorimètre avant injection de l'eau froide ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$),

D_2 est l'échauffement ou le refroidissement moyen du calorimètre en fin d'expérience une fois que Θ_f ou T_f a été atteinte,

D_1 et D_2 sont comptés positivement dans le cas d'un échauffement, négativement dans le cas d'un refroidissement.

5. Précision

On démontre que la précision de la mesure est donnée par la formule :

$$\frac{\Delta C}{C} = \Delta m \left[\frac{a}{m} + \frac{b}{\mu} + \frac{1}{m_0} \right] + \Delta T \left[\frac{a}{T_f - T_e} + \frac{2(b+1)}{T_i - T_f} + \frac{b}{\Theta_f - \Theta_e} + \frac{2b}{\Theta_i - \Theta_f} \right] + \Delta T_e \left[\frac{a}{T_f - T_e} + \frac{b}{\Theta_f - \Theta_e} \right]$$

dans laquelle, en plus des symboles précédemment définis,

Δm est l'erreur absolue de détermination des masses (kg),

ΔT est l'erreur absolue de détermination des températures T_i , T_f , Θ_i et Θ_f ($^{\circ}\text{C}$),

ΔT_e est l'erreur absolue de détermination des températures Θ_e et T_e ($^{\circ}\text{C}$).

$$a = \frac{m(T_f - T_e)}{m(T_f - T_e) - \mu_0(T_i - T_f)}$$

$$b = \frac{\mu_0(T_i - T_f)}{m(T_f - T_e) - \mu_0(T_i - T_f)}$$

6. Application numérique (carreau de terre cuite)6.1 Valeur en eau du calorimètre

$$\mu = 0,54306 \text{ kg}$$

$$\Theta_i = 38,760^{\circ} \text{ C}$$

$$C = 0,0054^{\circ} \text{ C} \text{ (négligeable)}$$

$$\Theta_e = 18,95^{\circ} \text{ C}$$

$$\Theta_f = 33,820^{\circ} \text{ C}$$

$$\mu_0 = 1,63468 \text{ kg}$$

6.2 Chaleur massique de l'échantillon

$$T_e = 19,10^{\circ} \text{ C}$$

$$m = 0,52621 \text{ kg}$$

$$C = -0,130^{\circ} \text{ C}$$

$$T_i = 38,920^{\circ} \text{ C}$$

$$m_0 = 2,31225 \text{ kg}$$

$$C = 0,160 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$$

$$T_f = 34,875^{\circ} \text{ C}$$

$$\mu_0 = 1,63468 \text{ kg}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = 0,04$$

Valeurs de $\left[\frac{T}{100}\right]^4$ en °K⁴

Réf. bibl. 4 p. 309

T	$\left[\frac{T}{100}\right]^4$	T	$\left[\frac{T}{100}\right]^4$	T	$\left[\frac{T}{100}\right]^4$
°C	°K ⁴	°C	°K ⁴	°C	°K ⁴
0	56	380	1 820	860	16 480
10	64	400	2 050	880	17 670
20	74	420	2 305	900	18 930
30	84	440	2 585	920	20 260
40	96	460	2 885	940	21 650
50	109	480	3 215	960	23 110
60	123	500	3 570	980	24 650
70	138	520	3 955	1 000	26 260
80	155	540	4 370	1 050	30 640
90	174	560	4 815	1 100	35 540
100	194	580	5 295	1 150	41 000
120	239	600	5 810	1 200	47 080
140	291	620	6 360	1 250	53 800
160	352	640	6 950	1 300	61 220
180	421	660	7 580	1 350	69 390
200	501	680	8 250	1 400	78 340
220	591	700	8 965	1 450	88 130
240	693	720	9 725	1 500	98 820
260	807	740	10 530	1 550	110 450
280	935	760	11 390	1 600	123 070
300	1 078	780	12 290	1 650	136 750
320	1 234	800	13 260	1 700	151 530
340	1 412	820	14 270	1 750	167 490
360	1 606	840	15 350	1 800	184 670

MESURE DU FACTEUR DE REFLEXION HEMISPHERIQUE MONOCHROMATIQUE

Laboratoire de l'Institut d'Optique Théorique et Appliquée

1. Généralités

On appelle facteur de réflexion hémisphérique monochromatique d'un matériau pour la longueur d'onde λ , la largeur spectrale $d\lambda$ et l'incidence $\vec{i}$, le rapport :

$$R_{\lambda}(\vec{i}, 2\pi) = \frac{d\phi_{\lambda}'(\vec{i}, 2\pi)}{d\phi_{\lambda}(\vec{i})}$$

dans lequel :

$d\phi_{\lambda}(\vec{i})$ est le flux incident dans l'angle solide $d\Omega(\vec{i})$,

$d\phi_{\lambda}'(\vec{i}, 2\pi)$ est le flux réfléchi dans tout le demi-espace.

L'échantillon n'étant pas transparent, le facteur d'absorption correspondant à la direction incidente $\vec{i}$ est

$$A_{\lambda}(\vec{i}) = 1 - R_{\lambda}(\vec{i}, 2\pi) = \varepsilon_{\lambda}(\vec{i}).$$

$\varepsilon_{\lambda}(\vec{i})$ étant le facteur d'émission dans la direction $\vec{i}$ pour la longueur d'onde λ .

La méthode de mesure directe revient à éclairer l'échantillon dans l'angle solide $d\Omega(\vec{i})$ et à mesurer le flux qu'il réfléchit dans tout le demi-espace supérieur (angle solide 2π).

Le rapport du flux réfléchi au flux incident donne, par conséquent, la valeur du facteur $R_{\lambda}(\vec{i}, 2\pi)$.

On démontre que, dans certaines conditions, on peut également évaluer ce facteur en éclairant l'échantillon dans un demi-espace et en mesurant le flux qu'il réfléchit dans l'angle solide $d\Omega(\vec{i})$. Il suffit que tous les éléments de la source hémisphérique aient une même luminance dans la direction de l'échantillon.

2. Description du montage (pl. 35)

Une source annulaire S éclaire une sphère qui diffuse la lumière par réflexion sur l'échantillon A, à la manière d'une source hémisphérique. L'échantillon est maintenu à une température voisine de 300°K par une circulation d'eau dans le porte-échantillon.

On capte la partie du flux réfléchi dans l'angle solide $d\Omega(\vec{i})$ à l'aide de deux miroirs M_1 et M_2 qui forment l'image de A sur la fente d'entrée F_1 d'un monochromateur. Un modulateur permet au détecteur de ne considérer que la partie utile du flux. Deux autres miroirs M_3 et M_4 conjuguent sa fente de sortie F_2 sur la surface sensible d'un détecteur D, dont les indications peuvent être envoyées sur un enregistreur E.

Le signal donné par le détecteur, lorsque l'échantillon est en place, est comparé à celui qu'il donne quand celui-ci est remplacé par un miroir de référence, dont le facteur de réflexion R_M est connu :

$$R(\vec{i}, 2\pi) = R_M \lambda \frac{d\phi'(\vec{i}, 2\pi)}{d\phi_{\lambda}}$$

$d\phi'(\vec{i}, 2\pi)$ et $d\phi_{\lambda}$ sont les flux captés en provenance de l'échantillon et du miroir de référence respectivement.

Si le détecteur est linéaire, il suffit de mesurer le rapport des deux signaux.

3. Précision

La méthode impose que la luminance de l'hémisphère soit indépendante de la direction. Cette condition est réalisée par l'intermédiaire d'une source annulaire, qui produit un éclairage de la sphère à peu près uniforme. Celle-ci est munie d'un revêtement orthotrope qui, par intégration, produit une luminance indépendante de la direction.

La précision de la mesure est de l'ordre de 1 à 2 %, selon la nature de l'échantillon.

4. Exemple

Mesure du facteur de réflexion hémisphérique monochromatique d'un carreau de terre cuite : voir pl. 24.

Mesure du coefficient de diffusivité thermique par la méthode du signal périodique

Laboratoire d'Echanges Thermiques

1. Principe

La méthode consiste à imposer sur les deux faces parallèles d'un barreau cylindrique taillé dans le matériau étudié, une température variant sinusoïdalement en fonction du temps et à enregistrer la variation - également sinusoïdale - de la température du plan médian.

La mesure du déphasage entre le signal émis et le signal reçu, permet de calculer la diffusivité du matériau constituant le barreau cylindrique par les formules (90)

$$\phi = \arg \frac{\text{ch} \alpha x (1 + i)}{\text{ch} \alpha l (1 + i)} \quad \text{et} \quad \alpha = \sqrt{\frac{\omega}{2a}}$$

dans lesquelles

- ϕ est le déphasage (radians),
- x la distance de la température enregistrée au plan médian (m),
- l la demi-longueur du barreau (m),
- i le nombre imaginaire tel que $i^2 = -1$,
- ω la pulsation du signal périodique (heure)⁻¹.

2. Mode opératoire

On applique contre chaque face du barreau un disque métallique chauffé par une résistance électrique dont la tension aux bornes varie suivant une loi périodique.

Un thermocouple placé sur une de ces faces permet de repérer sa température, et un potentiomètre d'enregistrer la variation du signal émis $\mu_0(t)$ en fonction du temps. Un autre thermocouple placé dans le plan médian de l'échantillon indique la valeur du signal reçu $\mu_1(t)$. Celle-ci est enregistrée sur le même diagramme que $\mu_0(t)$.

3. Dépouillement

On effectue successivement les opérations suivantes :

- on décompose les fonctions $\mu_0(t)$ et $\mu_1(t)$ en séries de Fourier :

$$\mu_0(t) = a_0 + b_0 \cos \omega t + b'_0 \sin \omega t + c_0 \cos 2\omega t + c'_0 \sin 2\omega t + \dots$$

$$\mu_1(t) = a_1 + b_1 \cos \omega t + b'_1 \sin \omega t + c_1 \cos 2\omega t + c'_1 \sin 2\omega t + \dots$$

- on calcule les coefficients $b''_0, c''_0, \dots, b''_1, c''_1, \dots$ et les angles φ_0 et φ_1 tels que :

$\mu_0(t)$ et $\mu_1(t)$ puissent s'écrire :

$$\mu_0(t) = a_0 + b''_0 \sin(\omega t + \varphi_0) + c''_0 \sin(2\omega t + \varphi_0) + \dots$$

$$\mu_1(t) = a_1 + b''_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + c''_1 \sin(2\omega t + \varphi_1) + \dots$$

Le déphasage entre $\mu_0(t)$ et $\mu_1(t)$ est $\phi = \varphi_0 - \varphi_1$

...

- On identifie ϕ à :

$$\arg \frac{\operatorname{ch} \alpha x_0 (1+i)}{\operatorname{ch} \alpha l (1+i)} - \arg \frac{\operatorname{ch} \alpha x_1 (1+i)}{\operatorname{ch} \alpha l (1+i)}$$

En tenant compte que $x_1 = 0$ et en développant l'expression précédente en série limitée, on obtient :

$$\phi = \operatorname{Arctg} \alpha^2 x_0^2 \left(1 + \frac{5}{36} \alpha^4 x_0^4 + \dots \right)$$

$$\text{soit } \operatorname{tg} \phi \simeq \alpha^2 x_0^2 \left(1 + \frac{5}{36} \alpha^4 x_0^4 \right)$$

4. Résultat

On en déduit la valeur de $\alpha^2 x_0^2$, et celle de la diffusivité recherchée :

$$a = \frac{\omega x_0^2}{2 \operatorname{tg} \phi} \quad (\text{m}^2/\text{heure})$$

5. Précision

La précision sur le calcul de "a" est :

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta \omega}{\omega} + 2 \frac{\Delta x_0}{x_0} + \frac{\Delta \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \phi}$$

Elle dépend donc :

- de la détermination de la pulsation ω fondamentale. Il faut apprécier la qualité du dispositif générateur d'une tension périodique aux bornes des résistances chauffantes ; on admet que :

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} = 0.01$$

- de la mesure de x_0 , distance du thermocouple périphérique au plan médian de l'échantillon. C'est le paramètre le plus délicat à mesurer et le plus influent sur le résultat, puisqu'il intervient par son carré. L'incertitude est fonction du diamètre des thermocouples utilisés.

Pour des fils de 0.2 mm de diamètre, $2 \Delta x_0 = 0.8 \text{ mm.}$

Pour $x_0 = 4 \text{ mm,}$ $\frac{\Delta x_0}{x_0} = 0.20$

- du calcul de $\operatorname{tg} \phi$ à partir des fonctions $\mu_0(t)$ et $\mu_1(t)$.

Pour un relevé d'une quinzaine de points répartis sur une période de chaque courbe et compte-tenu de l'épaisseur du trait de l'enregistrement, on admet que :

$$\frac{\Delta \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \phi} = 0.20$$

En conclusion, la précision de la mesure serait de 40 %.

6. Application numérique : voir planche 27.

EXPERIMENTATION SUR CARREAU DE TERRE CUITE

Densités de flux - Bilans thermiques

Cuisson n° 28

Densité de flux total q_t						Densité de flux de chaleur de rayonnement q_r ($\varphi = 0$)					
T_1	°C	400	700	1.000	500	T_1	°C	400	700	1.000	500
mc/s	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	1.4	1.4	1.4	1.9	T	°C	480	760	1.140	200
α	°C/h	2.300	265	4.480	-8.050	T_2	°C	220	440	860	640
$q_t = mc\alpha/s$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	3.200	370	6.260	-15.300	τ_{CO_2}	%	1.5	4.5	6.0	-
Densité de flux de chaleur de convection q_c						$\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	%	1.5	5.0	7.0	-
						ϵ		-	0.08	0.06	-
T	°C	480	760	1.140	200	ϵ_1		0.70	0.60	0.45	0.45
T_1	°C	400	700	1.000	500	ϵ_2		0.60	0.50	0.35	0.55
$\Delta T = T - T_1$	°C	80	60	140	-300	$(1 - \epsilon)\epsilon_2$		0.60	0.46	0.33	0.55
v air à 0°C	m ³ /h	570	460	-	730	$T_1^4 \times 10^{-8}$	°K ⁴	2.050	8.965	26.260	3.570
v' prod. de comb. à 0°C	m ³ /h	120	120	120	-	$T_2^4 \times 10^{-8}$	°K ⁴	591	2.585	16.480	6.950
$v' \frac{(v + v')}{0.044}$ à 0°C	m/h	15.700	13.200	2.730	16.600	$[T_1^4 - T_2^4] 10^{-8}$	°K ⁴	1.459	6.380	9.780	-3.380
μ' à T °C	$\frac{\text{kg}}{\text{mh}}$	0,130	0,157	0,190	0,094	$(1 - \epsilon)\epsilon_2 [T_1^4 - T_2^4] 10^{-8}$ °K ⁴		875	2.940	3.230	-1.860
$R = \frac{0.20 \times V' \times 1.3}{\mu'}$		31.400	21.900	3.740	45.800	$T^4 \times 10^{-8}$	°K ⁴	3.215	11.390	39.870	501
						$(T^4 - T_1^4) 10^{-8}$	°K ⁴	1.165	2.425	13.610	-3.069
λ	$\frac{\text{kcal}}{\text{mh} \cdot \text{°C}}$	0.70	0.85	0.95	1.00	$\epsilon [T^4 - T_1^4] 10^{-8}$	°K ⁴	-	194	817	-
$Nu = 0.323 \text{ Re}^{\frac{1}{4}} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}}$		53	44	18	62	$\frac{(1 - \epsilon)\epsilon_2 [T_1^4 - T_2^4] - \epsilon [T^4 - T_1^4]}{\epsilon [T^4 - T_1^4]} 10^{-8}$	°K ⁴	875	2.746	2.413	-1.860
$h = \frac{Nu \times \lambda}{0.10}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}}$	370	380	170	620	$\frac{\epsilon_1 \sigma \cdot 10^8}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°K}^4}$	5,7	5,5	5,7	5,8
$q_c = h \times \Delta T$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	29.600	22.500	23.800	-186.000	q_r	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	5.000	15.100	13.800	-10.800
Bilans thermiques											
q_t	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	3.200	370	6.260	-15.300	$q_t + q_r$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	8.200	15.470	20.060	-26.100
q_c	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	29.600	22.500	23.800	-186.000	$q_c - (q_t + q_r)$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	21.400	7.030	3.740	159.900
q_r	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	5.000	15.100	13.800	-10.800	$\frac{q_c - (q_t + q_r)}{q_c}$	%	72	31	16	85

EXPERIMENTATION SUR BRIQUE DE TERRE CUITE

Densités de flux - Bilans thermiques

Cuisson n° 14

Densité de flux total q_t						Densité de flux de chaleur de rayonnement q_r ($\varphi = 0.15$)					
T_1	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	400	700	900	500	T_1	$^\circ\text{C}$	400	700	900	500
mc/s	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	1.3	1.3	1.3	1.7	T	$^\circ\text{C}$	460	730	960	440
α	$^\circ\text{C}/\text{h}$	1.800	120	540	-3.000	T_2	$^\circ\text{C}$	200	640	780	580
$q_t = mc \alpha / s$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	2.340	160	700	-5.800	τ_{CO_2}	%	3.5	3.5	5.0	-
Densité de flux de chaleur de convection q_c						$\tau_{\text{H}_2\text{O}}$	%	4.0	4.0	6.0	-
						ϵ		0.08	0.07	0.06	-
T	$^\circ\text{C}$	460	730	980	440	ϵ_1		0.70	0.60	0.50	0.65
T_1	$^\circ\text{C}$	400	700	900	500	ϵ_2		0.60	0.50	0.40	0.45
$\Delta T = T - T_1$	$^\circ\text{C}$	60	30	60	-60	$(1 - \epsilon) \epsilon_2$		0.55	0.46	0.38	0.55
v air à 0°C	m^3/h	460	460	400	1.230	$\epsilon [1 + (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)\varphi]$		0.08	0.07	0.06	-
v' prod. de comb. à 0°C	m^3/h	120	120	150	-	$T_1^4 \times 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	2.050	8.965	18.930	3.570
$v' = \frac{(v+v')}{0.036}$ à 0°C	m/h	16.200	16.200	15.300	34.200	$T_2^4 \times 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	501	6.950	12.290	5.295
μ' à T $^\circ\text{C}$	$\frac{\text{kg}}{\text{mh}}$	0.126	0.154	0.176	0.132	$T_1^4 - T_2^4 \times 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	1.549	2.015	6.640	-1.725
$R = \frac{0.17 \times v' \times 1.3}{\mu'}$		28.400	23.300	19.200	57.200	$(1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	850	930	2.520	-950
						$T^4 \times 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	2.885	10.100	24.650	2.585
λ	$\frac{\text{kcal}}{\text{mh} \cdot ^\circ\text{C}}$	0.70	0.85	0.95	1.00	$(T^4 - T_1^4) 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	835	1.135	5.720	-985
$Nu = 0.323 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$		50	46	42	70	$\epsilon [1 + \dots] (T^4 - T_1^4) 10^{-8}$	$^\circ\text{K}^4$	67	80	344	-
$h = \frac{Nu \times \lambda}{0.33}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$	106	118	121	212	$\frac{\epsilon_1 \sigma \times 10^8}{1 - (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_2)(1 - \varphi)}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{K}^4}$	5.0	4.9	4.7	5.2
$q_c = h \times \Delta T$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	6.360	3.540	9.660	-12.700	q_r	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	3.920	4.160	10.200	-4.930
Bilans thermiques											
q_t	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	2.340	160	700	-5.800	$q_t + q_r$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	6.260	4.320	10.900	-10.730
q_c	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	6.360	3.540	9.660	-12.700	$q_c - (q_t + q_r)$	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	100	780	1.240	1.970
q_r	$\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$	3.920	4.160	10.200	-4.930	$\frac{q_c - (q_t + q_r)}{q_c}$	%	2	22	13	15

Expérimentation sur assiette de faïence - cuisson de biscuit

Densités de flux - bilans thermiques
cuisson n° 17

Densité de flux total q_t						Densité de flux de chaleur de rayonnement q_r ($\varphi = 0$)					
T_1	°C	400	700	1 100	500	T_1	°C	400	700	1 100	500
mc/s	$\frac{kcal}{m^2 \cdot ^\circ C}$	0,92	0,92	0,92	0,92	T	°C	520	850	1 250	430
α	°C/h	8 400	8 400	1 800	-4 500	T_2	°C	130	300	700	590
$q_t = mc \alpha / s$	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	7 700	7 700	1 660	-4 150	τ_{CO_2}	%	2,0	3,0	11,0	3,0
Densité de flux de chaleur de convection q_c						τ_{H_2O}	%	2,0	3,0	12,0	3,0
T	°C	520	850	1 250	430	ϵ		0,07	0,07	0,09	0,08
T_1	°C	400	700	1 100	500	ϵ_1		0,65	0,50	0,35	0,60
$\Delta T = T - T_1$	°C	120	150	150	- 70	ϵ_2		0,60	0,55	0,40	0,45
voir à 0 °C	m^3/h	330	220	-	150	$(1 - \epsilon) \epsilon_2$		0,56	0,51	0,35	0,41
v' prod. de comb. à 0 °C	m^3/h	160	160	160	60	$T_1^4 \times 10^{-8}$	°K ⁴	2 050	8 965	35 540	3 570
$V' = \frac{(v + v')}{0,029}$ à 0 °C	m/h	16 900	13 100	5 500	7 250	$T_2^4 \times 10^{-8}$	°K ⁴	265	1 078	8 965	5 520
μ' à T °C	$\frac{kg}{mh}$	0,133	0,165	0,198	0,124	$(T_1^4 - T_2^4) \times 10^{-8}$	°K ⁴	1 785	7 887	26 573	-1 950
$R = \frac{0,15 \times V' \times 1,3}{\mu'}$		24 700	15 500	5 410	11 400	$(1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4)$	°K ⁴	1 000	4 010	9 300	- 800
λ	$\frac{kcal}{mh \cdot ^\circ C}$	0,7	0,9	1,1	1,1	$\frac{T^4 \times 10^{-8}}{(T^4 - T_1^4) \times 10^{-8}}$	°K ⁴	1 905	7 035	18 260	-1 130
$Nu = 0,323 R_e^{\frac{1}{2}} Pr^{1/3}$		47	36	22	31	$\epsilon(T^4 - T_1^4) \times 10^{-8}$	°K ⁴	133	492	1 640	- 90
$h = \frac{Nu \times \lambda}{0,20}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot ^\circ C}$	165	162	121	170	$\frac{((1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) - \epsilon(T^4 - T_1^4)) \times 10^{-8}}{\epsilon_1 \times 10^8}$	°K ⁴	867	3 518	7 660	- 710
$q_c = h \Delta T$	$\frac{kcal}{m^2 h}$	19 800	24 300	18 200	-11 900	$\frac{\epsilon_1 \times 10^8}{1 - (1 - \epsilon) (1 - \epsilon_2)}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot K^4}$	5,1	5,8	3,8	6,0
						q_r	$\frac{kcal}{m^2 h}$	4 410	20 400	29 100	-4 260
Bilans thermiques											
q_t	$\frac{kcal}{m^2 h}$	7 700	7 700	1 660	-4 150	$q_t + q_r$	$\frac{kcal}{m^2 h}$	12 110	28 100	30 760	-8 410
q_c	$\frac{kcal}{m^2 h}$	19 800	24 300	18 200	-11 900	$ q_c - (q_t + q_r) $	$\frac{kcal}{m^2 h}$	7 690	3 800	12 560	3 490
q_r	$\frac{kcal}{m^2 h}$	4 410	20 400	29 100	-4 260	$ \frac{q_c - (q_t + q_r)}{q_c} $	%	39	16	69	29

Expérimentation sur assiettes de faïence - cuisson d'émail

Densités de flux - bilans thermiques
cuisson n° 17

Densité de flux total q_t						Densité de flux de chaleur de rayonnement q_r ($\psi = 0$)					
T_1	°C	400	700	1 000	500	T_1	°C	400	700	1 000	500
mc/s	$\frac{kcal}{m^2 \cdot ^\circ C}$	0,74	0,74	0,74	0,74	T	°C	420	750	1 100	460
α	°C/h	2 640	2 640	2 640	-6000	T_2	°C	280	450	780	620
$q_t = mc\alpha / s$	$\frac{kcal}{m^2 h}$	1 960	1 960	1 960	-4440	τ_{CO_2}	%	0,03	0,06	0,09	0,02
Densité de flux de chaleur de convection q_c						τ_{H_2O}	%	0,03	0,07	0,10	0,02
						{		0,06	0,12	0,08	0,07
						ϵ_1		0,60	0,45	0,30	0,55
						ϵ_2		0,60	0,50	0,40	0,45
						$(1 - \epsilon) \epsilon_2$		0,56	0,44	0,37	0,42
						$T_1^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	2 050	8 965	26 260	3 570
						$T_2^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	935	2 700	12 290	6 360
						$(T_1^4 - T_2^4) \times 10^{-8}$	° K ⁴	1 115	6 265	13 970	-2 790
						$(1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) \times 10^{-8}$	° K ⁴	625	2 730	5 160	-1 170
						$T^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	2 305	10 850	35 540	2 885
T	°C	420	750	1 100	460	$(T^4 - T_1^4) \times 10^{-8}$	° K ⁴	255	8 120	9 280	- 685
T_1	°C	400	700	1 000	500	$\epsilon (T^4 - T_1^4) \times 10^{-8}$	° K ⁴	15	975	745	- 48
$\Delta T = T - T_1$	°C	20	50	100	- 40	$\frac{\epsilon (1 - \epsilon) \epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4)}{1 - (1 - \epsilon) (1 - \epsilon_2)}$	° K ⁴	610	1 755	4 415	-1 122
Voir à 0 °C	m ³ /h	460	330	30	330	$\frac{\epsilon_1 \sigma \times 10^8}{1 - (1 - \epsilon) (1 - \epsilon_2)}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot K^4}$	4,8	4,0	3,3	5,5
v' prod de comb. 0°C	m ³ /h	100	100	150	60	q_r	$\frac{kcal}{m^2 h}$	2 930	7 020	14 550	-6 180
$v' = \frac{(v + v')}{0,029}$ à 0°C	m/h	19 300	14 850	6 200	13 450						
μ' à T °C	$\frac{kg}{mh}$	0,122	0,156	0,186	0,126						
$R = \frac{0,15 v' \times 1,3}{\mu'}$		30 900	18 600	6 500	20 800						
λ	$\frac{kcal}{mh \cdot ^\circ C}$	1,1	1,1	1,2	1,1						
$Nu = 0,323 Re^{\frac{1}{4}} Pr^{\frac{1}{3}}$		52	41	24	42						
$h = \frac{Nu \times \lambda}{0,20}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot ^\circ C}$	286	226	144	230						
$q_c = h \Delta T$	$\frac{kcal}{m^2 h}$	5 720	11 300	14 400	-9 200						

Bilans thermiques

q_t	$\frac{kcal}{m^2 h}$	1960	1960	1960	-4 440	$q_t + q_r$	$\frac{kcal}{m^2 h}$	4 890	8 980	16 510	- 10 620
q_c	$\frac{kcal}{m^2 h}$	5720	11300	14400	-9 200	$ q_c - (q_t + q_r) $	$\frac{kcal}{m^2 h}$	830	2 320	2 110	1 420
q_r	$\frac{kcal}{m^2 h}$	2930	7020	14550	-6 180	$\frac{q_c - (q_t + q_r)}{q_c}$	%	15	20	15	15

Expérimentation sur carreaux de grès
Densités de flux - bilans thermiques
cuisson n° 22

Densité de flux total q_t						Densité de flux de chaleur de rayonnement q_r ($\varphi = 0$)					
T_1	°C	700	1 150	800	400	T_1	°C	700	1 150	800	400
mc/s	$\frac{kcal}{m^2 \cdot ^\circ C}$	2,00	2,00	2,00	2,00	T	°C	760	1 080	780	340
α	°C/h	1 500	-2 100	- 75	-3 900	T_2	°C	420	900	860	620
$q_t = mc\alpha/s$	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	3 000	-4 200	- 150	-7 800	τ_{CO_2}	%	4,0	11,0	4,0	1,0
Densité de flux de chaleur de convection q_c						τ_{H_2O}	%	4,5	12,5	4,5	1,0
T	°C	760	1 080	780	340	ϵ		0,08	0,12	0,08	0,05
T_1	°C	700	1 150	800	400	ϵ_1		0,50	0,35	0,50	0,65
$\Delta T = T - T_1$	°C	60	- 70	- 20	- 60	ϵ_2		0,50	0,35	0,35	0,45
Voir à 0°C	m^3/h	365	40	190	1 250	$(1-\epsilon)\epsilon_2$		0,46	0,31	0,32	0,43
voir prod. combust. à 0 °C	m^3/h	180	60	150	60	$T_1^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	8 965	41 000	13 260	2 050
$V' = \frac{(v + v')}{0,024}$ à 0 °C	m/h	22 700	4 160	14 220	54 500	$T_2^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	2 305	18 930	16 480	6 360
p' à T °C	$\frac{kg}{mh}$	0,157	0,185	0,159	0,114	$(T_1^4 - T_2^4) 10^{-8}$	° K ⁴	6 660	22 070	-3 220	-4 310
$R = \frac{0,15 \times V' \times 1,3}{p'}$		28 200	4 380	17 450	93 200	$(1-\epsilon)\epsilon_2 (T_1^4 - T_2^4)$	° K ⁴	3 060	6 850	-1 030	-1 855
λ	$\frac{kcal}{mh \cdot ^\circ C}$	1,0	1,2	1,1	1,1	$T^4 \times 10^{-8}$	° K ⁴	11 390	32 200	12 290	1 412
$Nu = 0,323 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$		50	20	40	90	$(T^4 - T_1^4) 10^{-8}$	° K ⁴	2 425	8 800	- 970	- 638
$h = \frac{Nu \times \lambda}{0,106}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot ^\circ C}$	471	226	415	933	$\epsilon(T^4 - T_1^4) 10^{-8}$	° K ⁴	194	1 060	- 77	- 32
$q_c = h \Delta T$	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	28 300	-15 800	-8 300	-56 000	$\frac{\epsilon_1 \sigma 10^8}{1 - (1-\epsilon)(1-\epsilon_2)}$	$\frac{kcal}{m^2 h \cdot K^4}$	2 870	5 790	- 953	-1 823
						q_r	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	5,0	4,0	6,2	6,7
								14 350	-23 200	-5 900	-12 350

Bilans thermiques

q_t	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	3 000	-4 200	- 150	-7 800	$q_t + q_r$	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	17 350	27 400	-6 050	-20 050
q_c	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	28 300	-15 800	-8 300	-56 000	$ q_c - (q_t + q_r) $	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	10 950	11 600	2 250	35 950
q_r	$\frac{kcal}{m^2 \cdot h}$	14 350	-23 200	-5 900	-12 250	$\frac{ q_c - (q_t + q_r) }{q_c}$	%	39	73	27	64

ExpérimentationPrincipales caractéristiques physiques des matériaux traités

	Terre cuite	Faïence		Grès
		Crue	Biscuitée	
Porosité ouverte (%)	24,5	30,5	23,7	25,0
Chaleur massique (kcal/kg°C)	à 37°C : 0,16	à 90°C : 0,25	à 85°C : 0,20	à 85°C : 0,25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	2 080	1 660	2 000	1 820
Diffusivité thermique (m ² /h)	à 44°C : 1,5 x 10 ⁻³	à 54°C : 1,2 x 10 ⁻³	à 50°C : 2,5 x 10 ⁻³	à 55°C : 1,6 x 10 ⁻³
Conductivité thermique équiv. (kcal/mh°C)				
• à 50°C environ	0,5	0,5	1,0	0,7
• à 500°C environ après vitrification	1,0	1,1	1,1	1,1

Exemples de cuisson rapide en four à passage

	Terre cuite		Faïence	Grès
	Carreaux	Briques	Assiettes	Carreaux
Production P (kg/h)	100	1000	200	500
Température T (°C)	1080	950	1260	1240
Masse unitaire (kg)	0.175	3.950	0.385	0.210
Nombre d'unités par rang	10	10	2	40
Largeur du passage (m)	0.30	1.30	0.50	1.20
Hauteur de passage (m)	0.15	0.15	0.08	0.15
Section du passage (m ²)	0.045	0.195	0.040	0.180
Nombre de rangs par mètre	7	3	4	8
Nombre d'unités par mètre	70	30	8	320
Densité de chargement linéique (kg/m)	12	120	3	67
Durée du cycle (h)	1.5	4.0	0.5	9.0
Longueur du four* (m)	13	33	33	67

* suivant abaque par points alignés : planche n° 41.

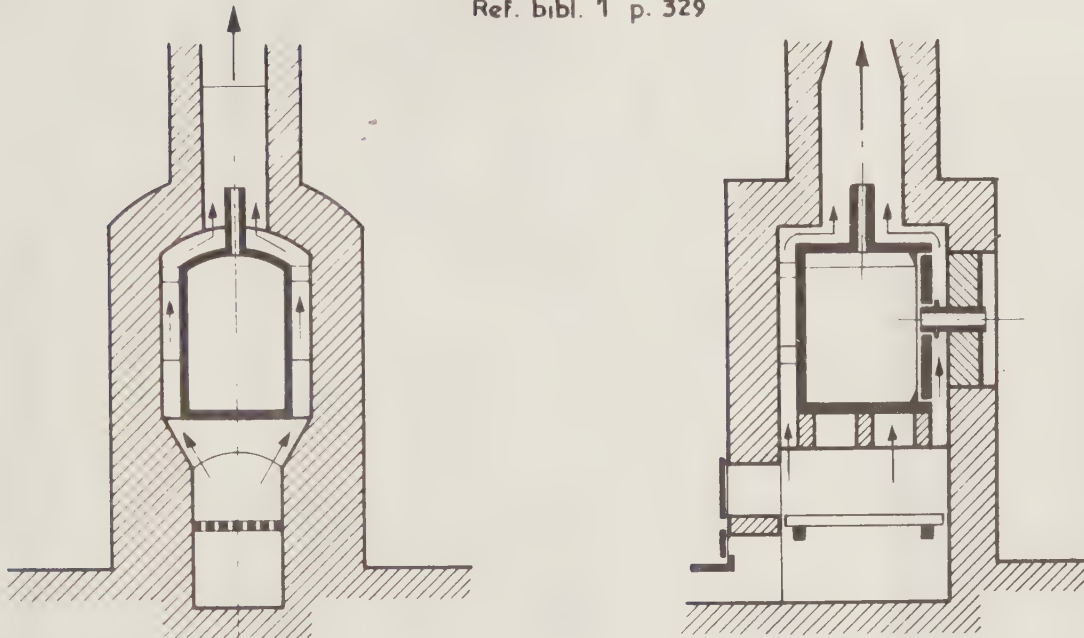
- 1 - Moufle à flammes directes - Four rond à flammes renversées
- 2 - Schéma de fonctionnement d'un four à galeries - Schéma d'un four tunnel
- 3 - Four à gaz 2 m³
- 4 - Représentation des silicates
- 5 - Représentation des silicates
- 6 - Diagramme dilatométrique de la silice
- 7 - Intérêt des réfractaires isolants
- 8 - Diagramme de combustion du propane commercial
- 9 - Simulateur de four à passage - ensemble
- 10 - Parois du laboratoire - Courbes de température en régime permanent
- 11 - Brûleur tunnel T 2 M 7
- 12 - Brûleur tunnel T 2 M 7 - Propane
- 13 - Simulateur de four à passage - Schéma de principe
- 14 - Régulateur de proportions
- 15 - Schéma de l'installation du régulateur de proportions
- 16 - Distributeur des circuits fluides - Diagramme séquentiel
- 17 - Essai préliminaire - Cuisson d'une brique creuse - Disposition des thermocouples
- 18 - Simulateur de four à passage - Vue d'ensemble
- 19 - Expérimentation - Mode opératoire - Chauffage
- 20 - Expérimentation sur terre cuite - Carreau
- 21 - Expérimentation sur terre cuite - Brique
- 22 - Caractéristiques de l'air
- 23 - Expérimentation sur terre cuite - Carreau : indicatrice de réflexion - incidence 30°
- 24 - Expérimentation sur terre cuite - Carreau : variations des facteurs de réflexion hémisphérique R et d'émission A en fonction de la longueur d'onde à T = 300°K
- 25 - Représentation graphique du théorème 1 § 4.221
- 26 - Représentation graphique de la fonction :

$$T(x,t) = T_0 + \alpha t - \frac{4 \alpha C}{\pi I} \sin \frac{\pi x}{I} (1 - e^{-\frac{t}{C}})$$
- 27 - Mesure de la diffusivité thermique par la méthode du signal périodique - Terre cuite : carreau
- 28 - Echanges thermiques par convection
- 29 - Schéma du rayonnement de C₁ vers C₂
- 30 - Schéma du rayonnement de C₂ vers C₁
- 31 - Facteur d'émission des gaz
- 32 - Expérimentation - Bilans thermiques instantanés
- 33 - Expérimentation sur terre cuite - Représentation des échantillons et positions des thermocouples
- 34 - Expérimentation sur terre cuite - Courbes optimales de cuisson
- 35 - Mesure du facteur de réflexion hémisphérique monochromatique
- 36 - Expérimentation sur faïence et sur grès - Représentation des échantillons et positions des thermocouples
- 37 - Expérimentation sur faïence - Courbe de dilatation-retrait - Courbe d'analyse thermique différentielle
- 38 - Expérimentation sur faïence et sur grès - Courbes optimales de cuisson
- 39 - Expérimentation sur faïence - Courbes de dilatation sur cuit
- 40 - Expérimentation sur grès - Courbe de dilatation-retrait - Courbe d'analyse thermique différentielle
- 41 - Caractéristiques d'un four à passage - Abaque par points alignés

MOUFLE A FLAMMES DIRECTES

Figure n° 1

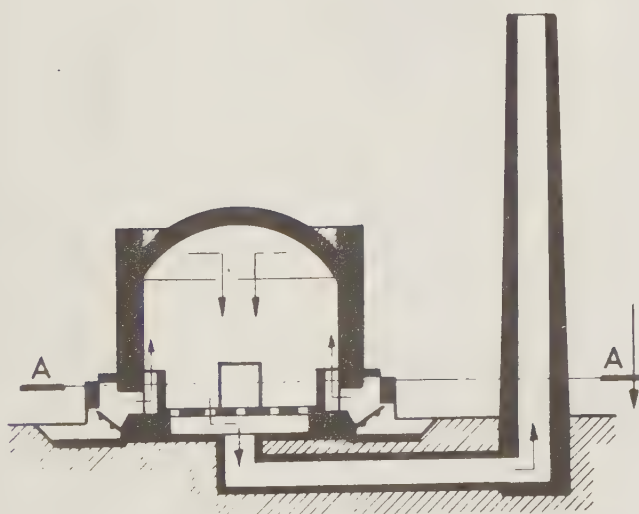
Réf. bibl. 1 p. 329



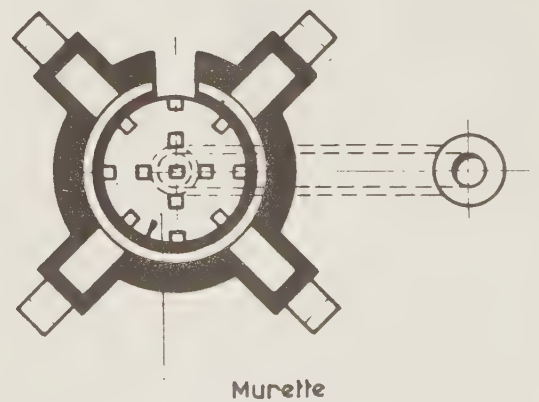
FOUR ROND A FLAMMES RENVERSEES

Figure n° 2

Réf. bibl. 1 p. 325



Coupe A



SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN FOUR A GALERIES

Figure n° 1

Réf bibl. 1 - p. 341

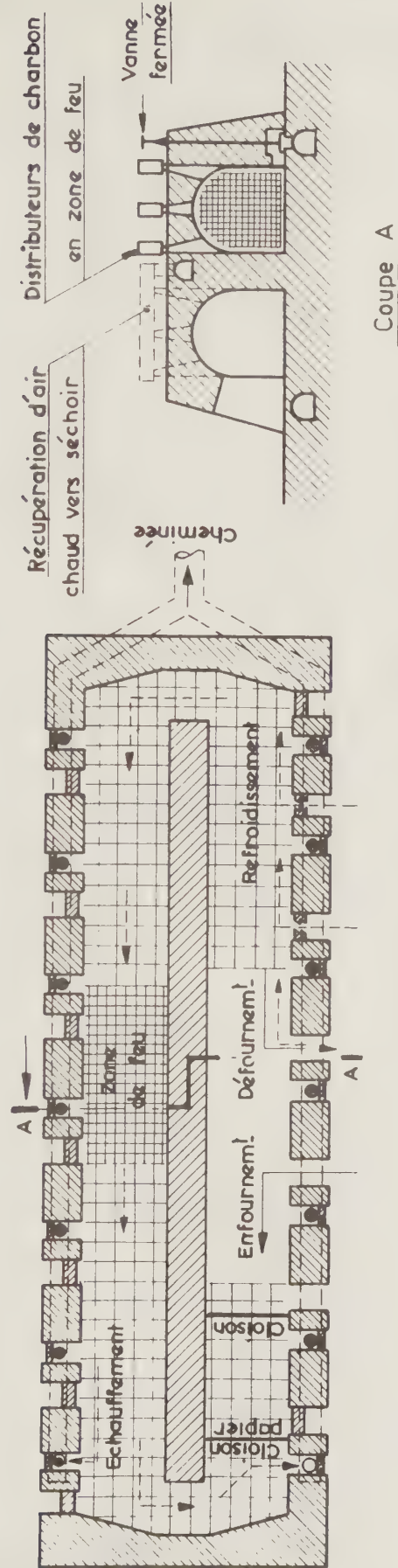
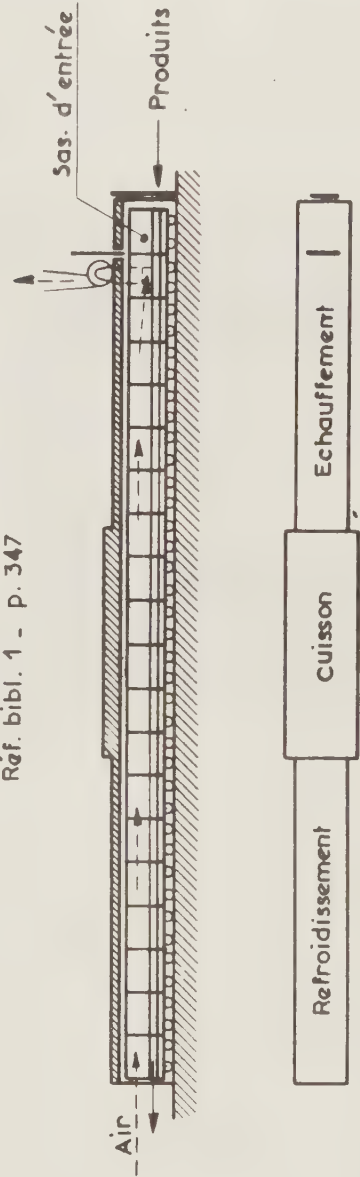


Figure n° 2

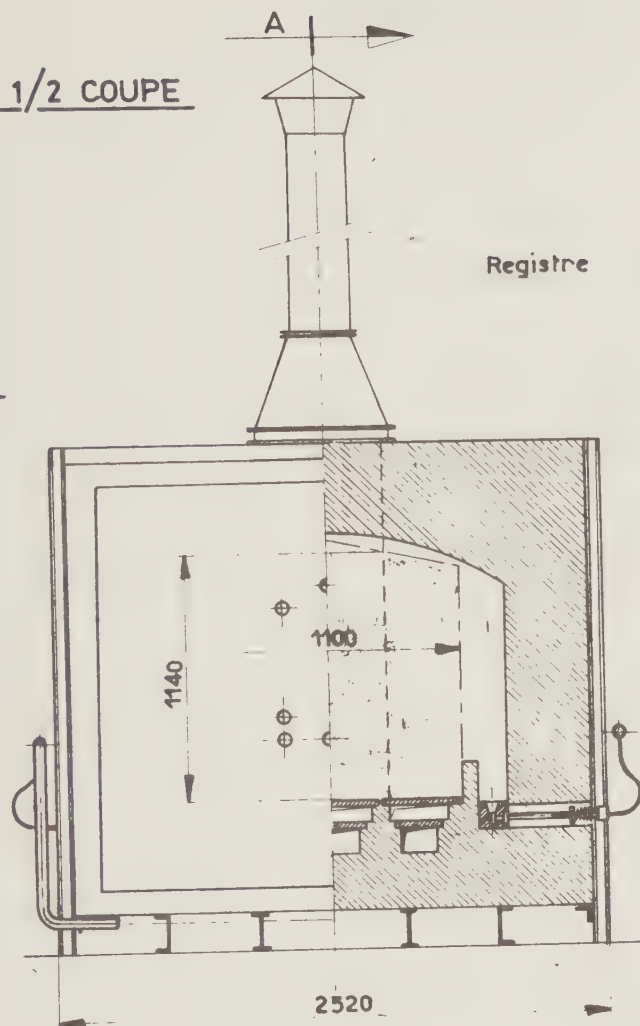
Réf. bibl. 1 - p. 347



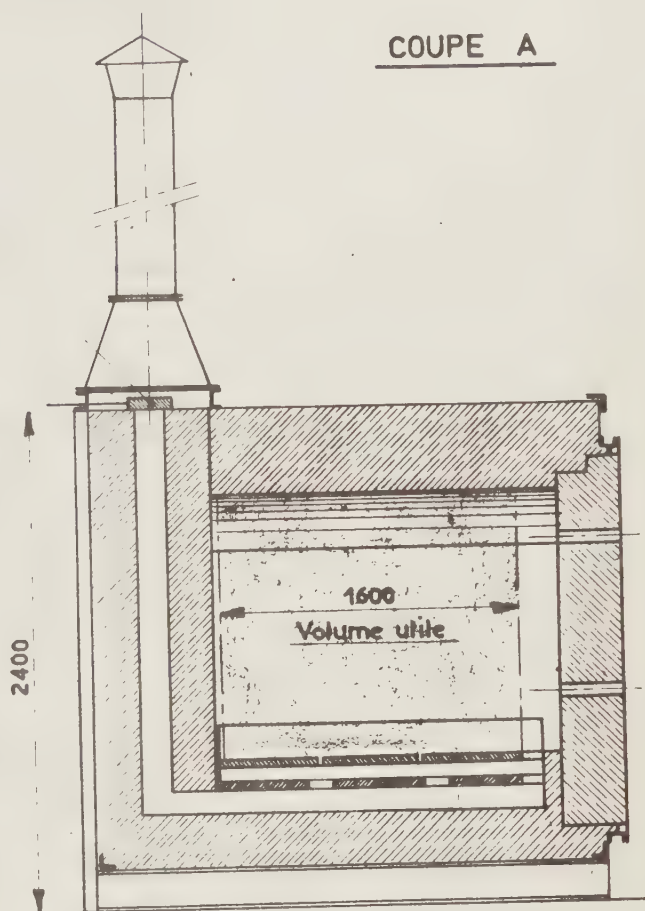
SCHEMA D'UN FOUR TUNNEL

FOUR A GAZ 2 m³

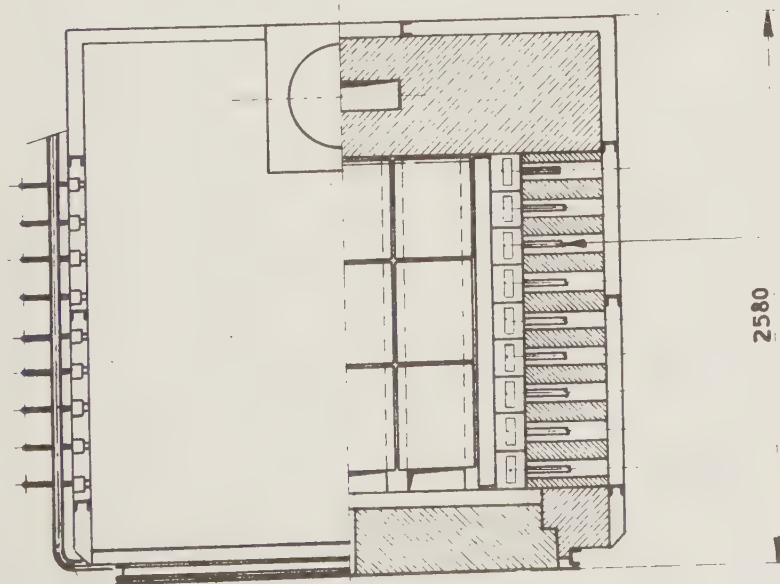
1/2 COUPE



COUPE A



1/2 COUPE



Brûleurs

Collecteur d'alimentation en gaz

REPRESENTATION DES SILICATES

Réf. bibl. 62

Figure n° 1

Structure en îlot

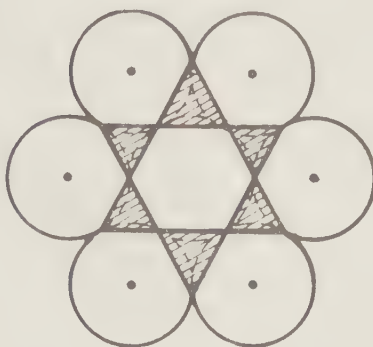


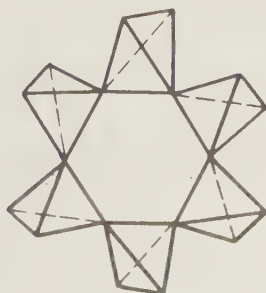
Figure n° 2

Structure en double tétraèdre



Figure n° 3

Structure cyclique



REPRESENTATION DES SILICATES

Réf. Libl. 62

Figure n° 1

Structure en chaîne

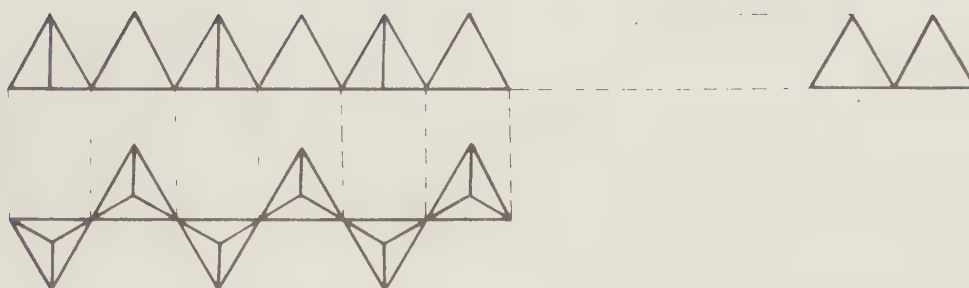


Figure n° 2

Structure en rubans

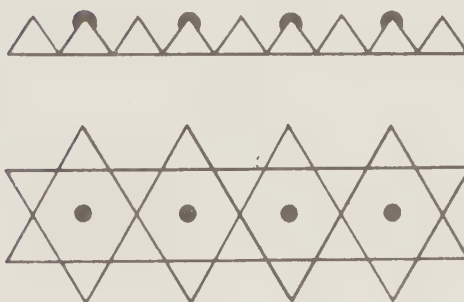


Figure n° 3

Structure en feuillets

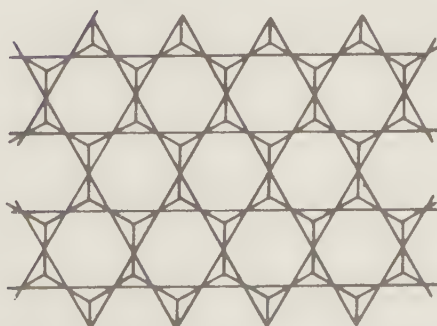
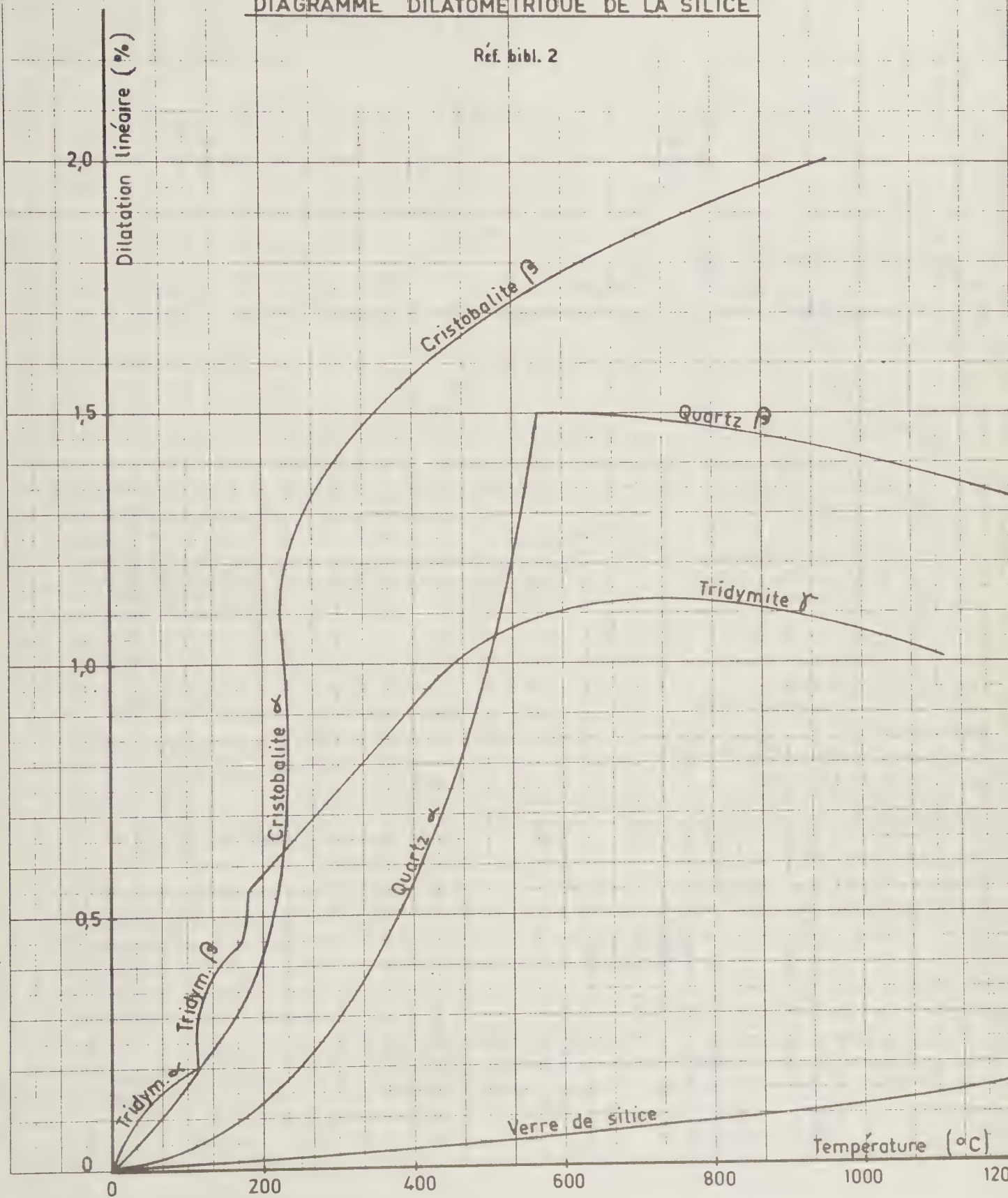


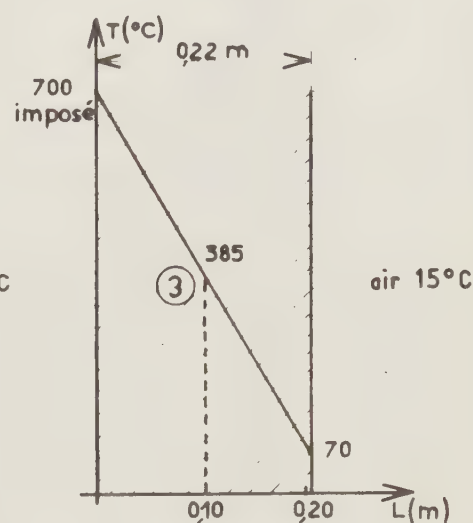
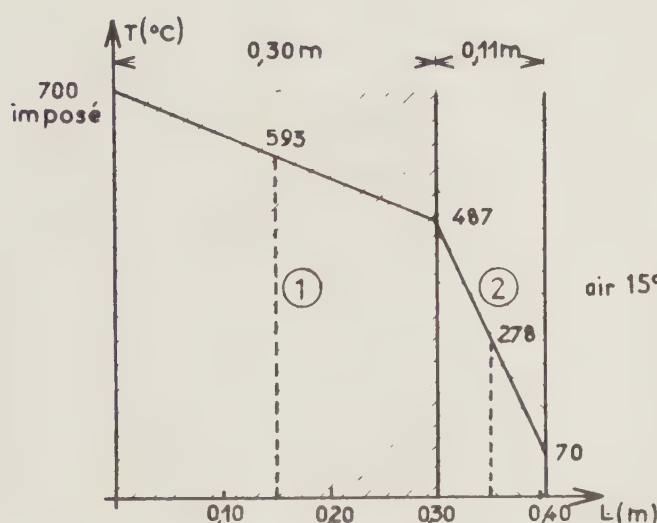
DIAGRAMME DILATOMETRIQUE DE LA SILICE

Réf. bibl. 2



INTERET DES REFRACTAIRES ISOLANTS

Réf. bibl. 71



Nature	Silico-argileuse	Diatomite
Densité	1,80	0,5
Conductivité (kcal/m ² °Ch)	0,30	0,15
Epaisseur (m)	0,30	0,11
Temp. Ext.°C		+15,0
Coef. déperd. surf. extér. (kcal/m ² °Ch)	-	10
Chal. spécif. (kcal/kg°C)	0,21	0,21

Argileuse
0,7
0,2
0,22
+ 15,0
10
0,21

Densités de flux (déperditions)	$q_{1-2} = \frac{700 - 15}{\frac{0,30}{0,80} + \frac{0,11}{0,15} + \frac{1}{10}} = 570 \text{ kcal/m}^2\text{h}$	$q_3 = \frac{700 - 15}{\frac{0,22}{0,20} + \frac{1}{10}} = 570 \text{ kcal/m}^2\text{h}$
------------------------------------	--	--

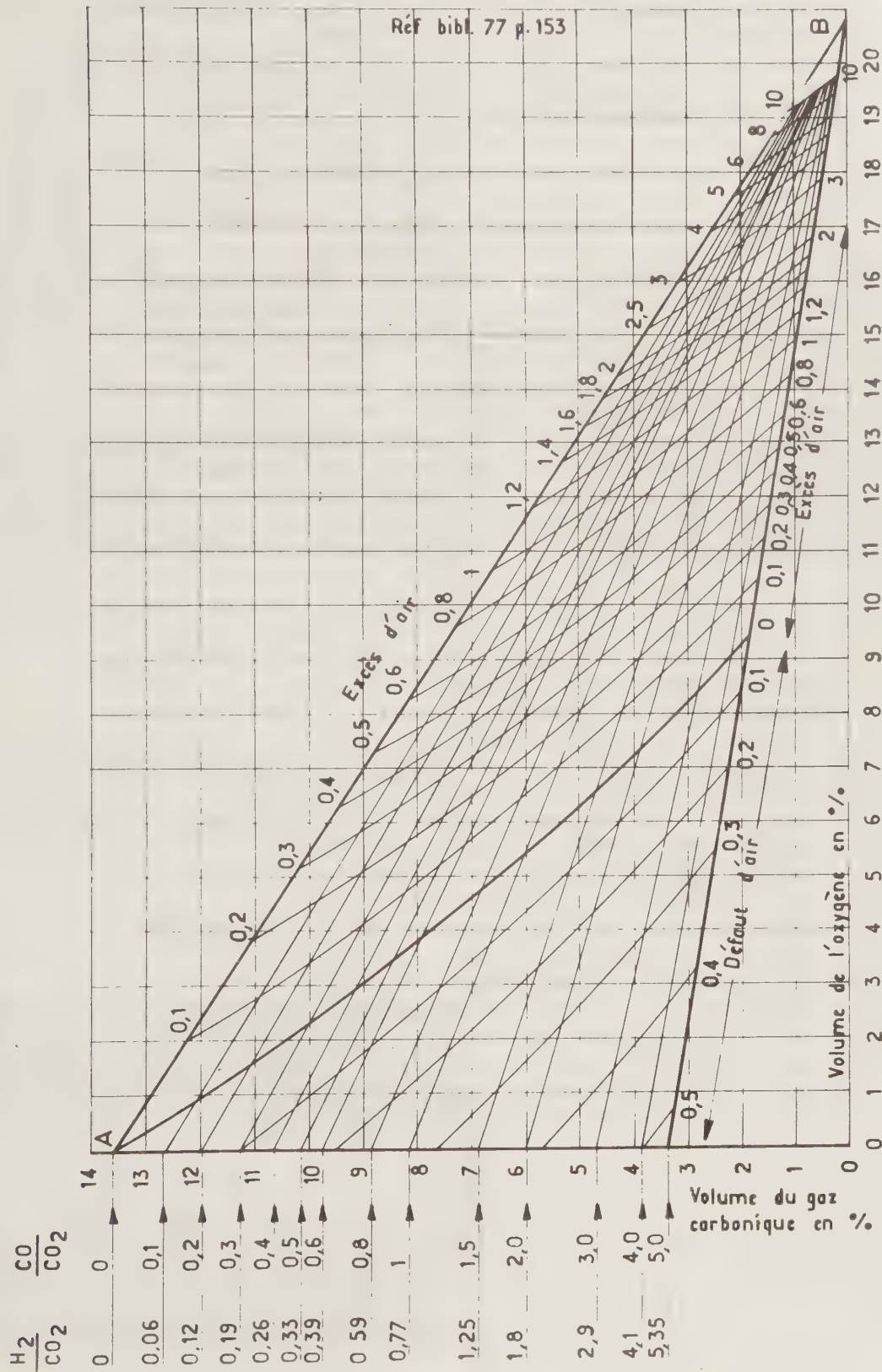
Poids (par m ² de paroi)	$P_1 = 0,30 \times 1,80 = 0,540 \text{ t}$ $P_2 = 0,11 \times 0,50 = 0,055 \text{ t}$ $P_{1-2} = 0,595 \text{ t}$	$P_3 = 0,22 \times 0,7 = 0,154 \text{ t}$ $\frac{P_{1-2}}{P_3} = 3,87$
-------------------------------------	---	---

Capacités calorifiques (par m ² de paroi)	$C_1 = 540 \times 0,21 (593 - 15) = 65.500 \text{ kcal}$ $C_2 = 55 \times 0,21 (278 - 15) = 3.040 \text{ kcal}$ $C_{1-2} = 68.540 \text{ kcal}$	$C_3 = 154 \times 0,21 (385 - 15) = 11.960 \text{ kcal}$ $\frac{C_{1-2}}{C_3} = 5.73$
---	---	--

Temps de mise en régime	. Densité de flux imposée : 25.000 kcal/m ² h . Déperditions mise en régime = 0,5 déperditions régime établi	
	$t_{1-2} = \frac{68.540}{25.000 - 0,5 \times 570} = 2 \text{ h.45 min.}$	$t_3 = \frac{11.960}{25.000 - 0,5 \times 570} = 29 \text{ min.}$ $\frac{t_{1-2}}{t_3} = 5.68$

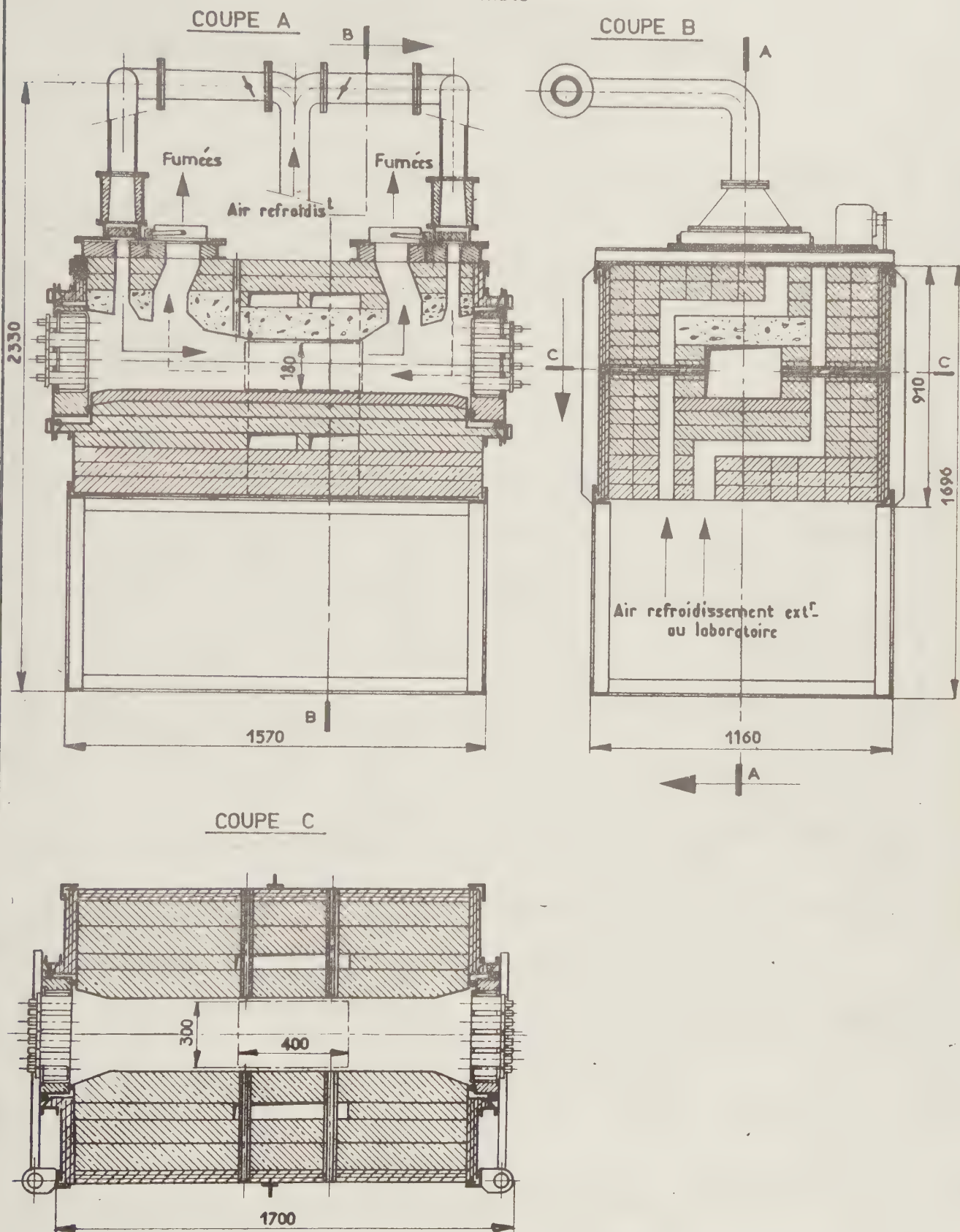
DIAGRAMME DE COMBUSTION DU PROPANE COMMERCIAL

Planche n° 8



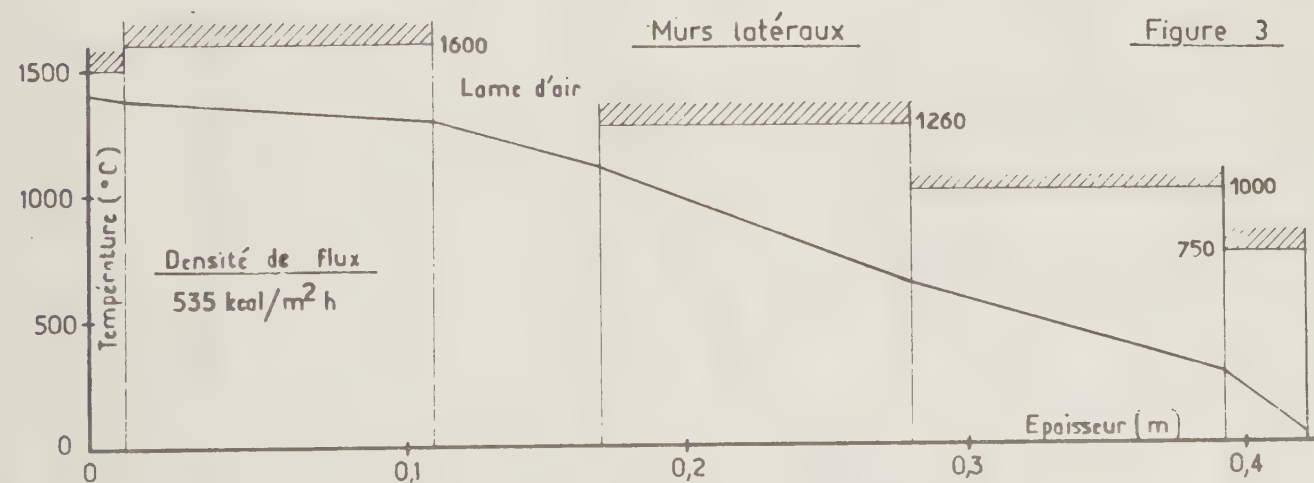
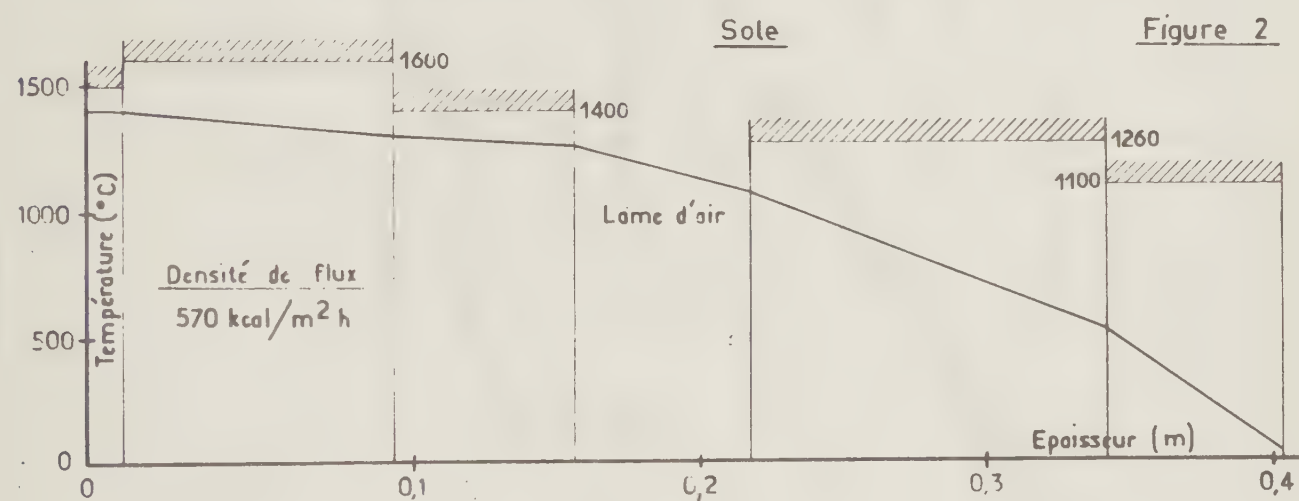
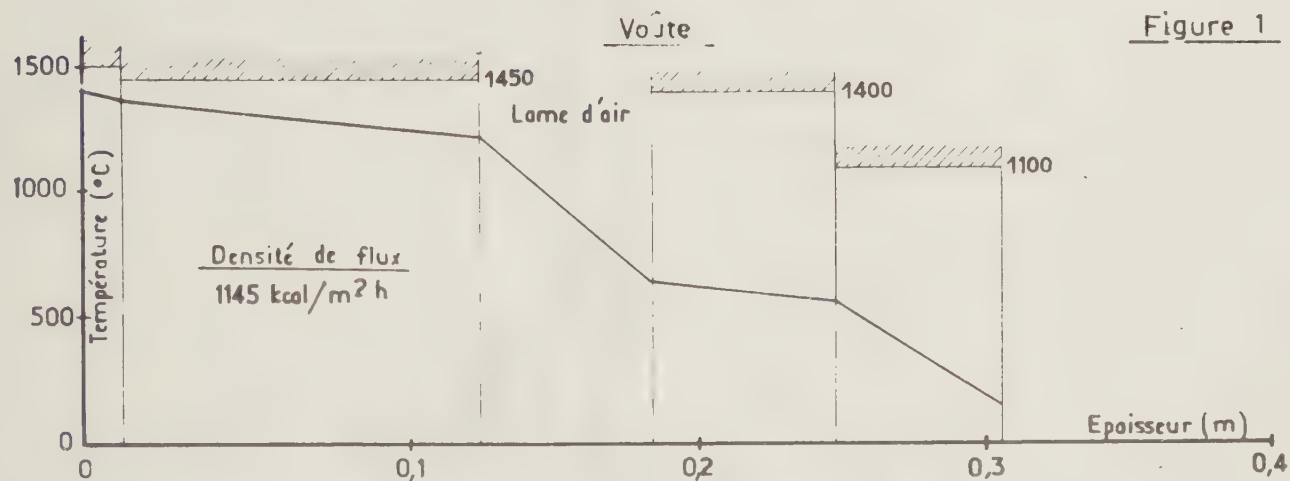
SIMULATEUR DE FOUR A PASSAGE

Ensemble



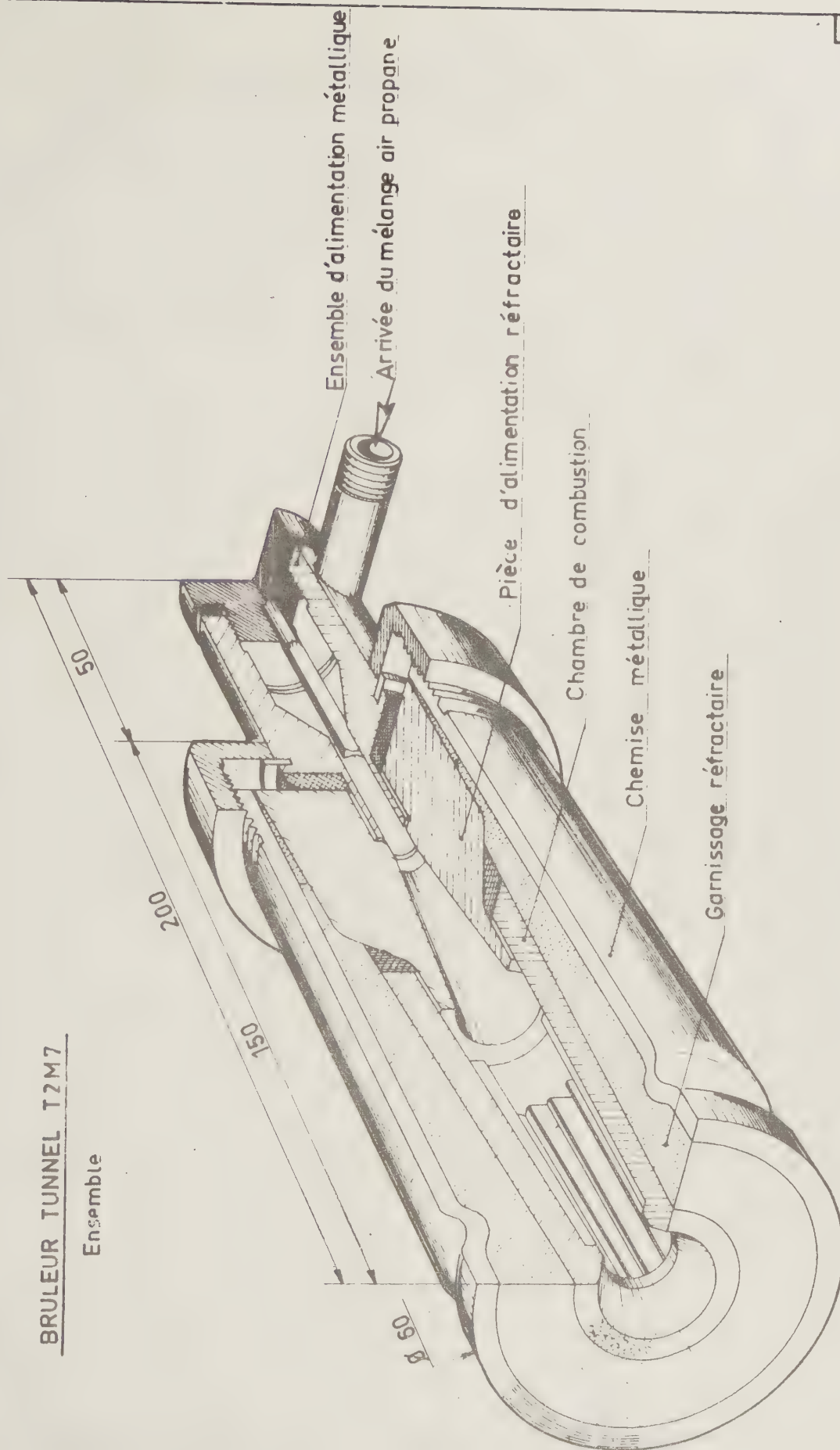
PAROIS DU LABORATOIRE
COURBES DE TEMPERATURE EN REGIME PERMANENT

Annexe 12



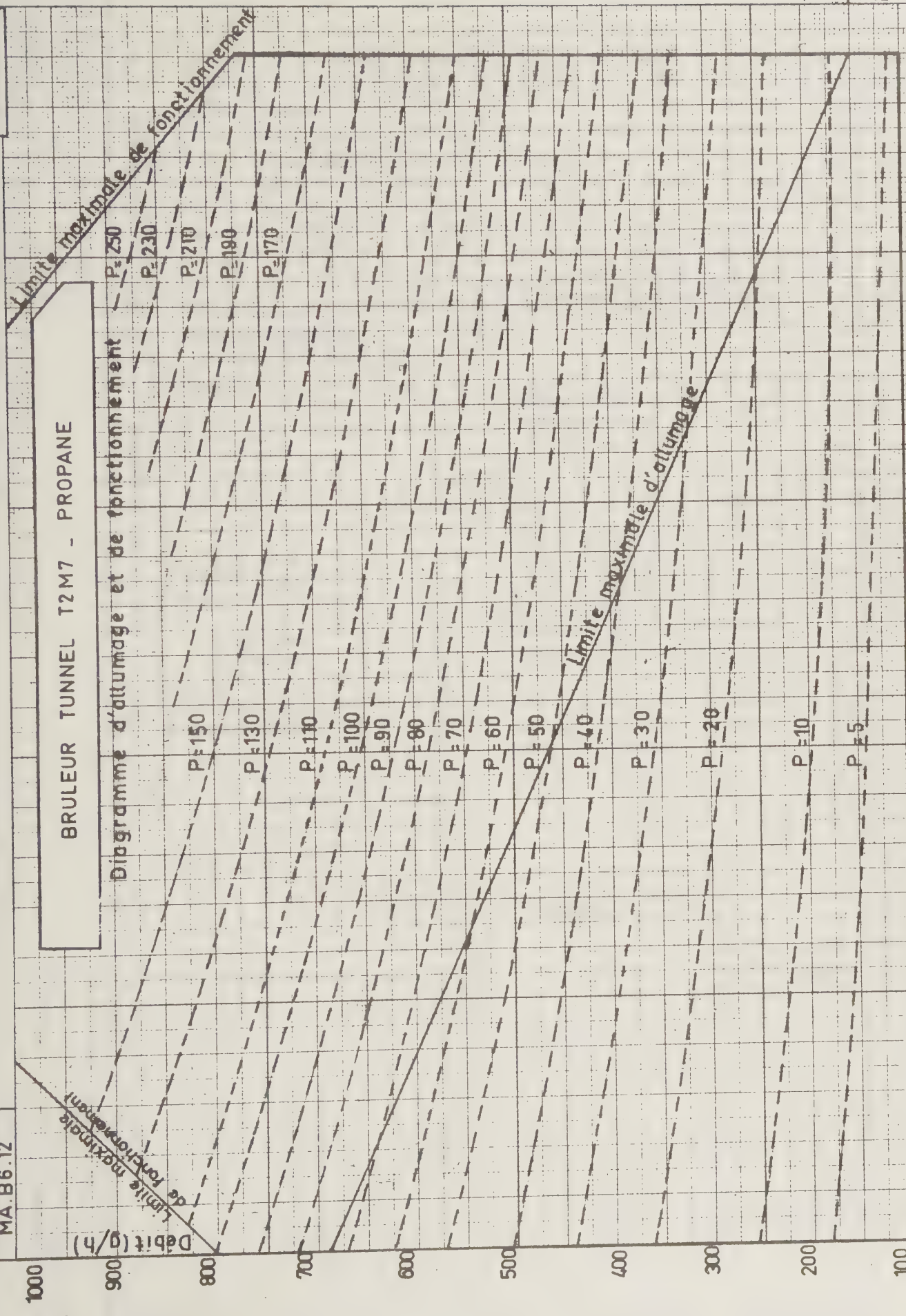
BRULEUR TUNNEL T2M7

Ensemble



BRULEUR TUNNEL T2M7 - PROPANE

Diagramme d'allumage et de fonctionnement

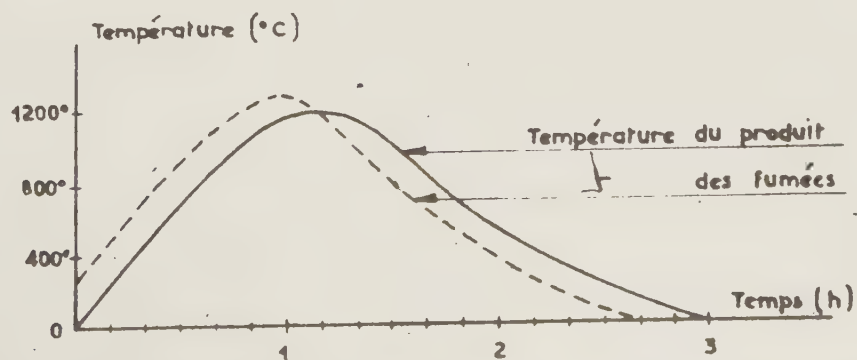
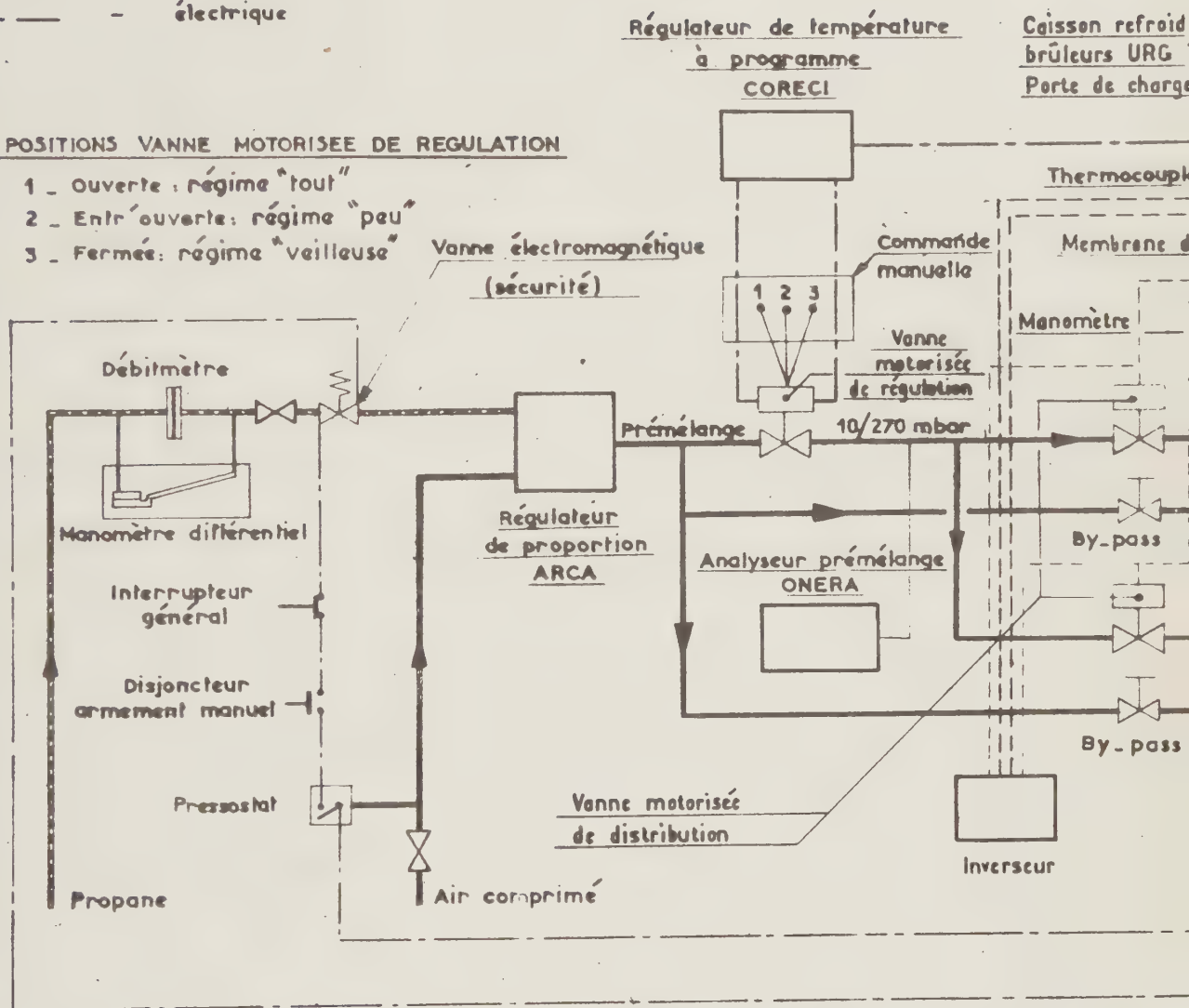


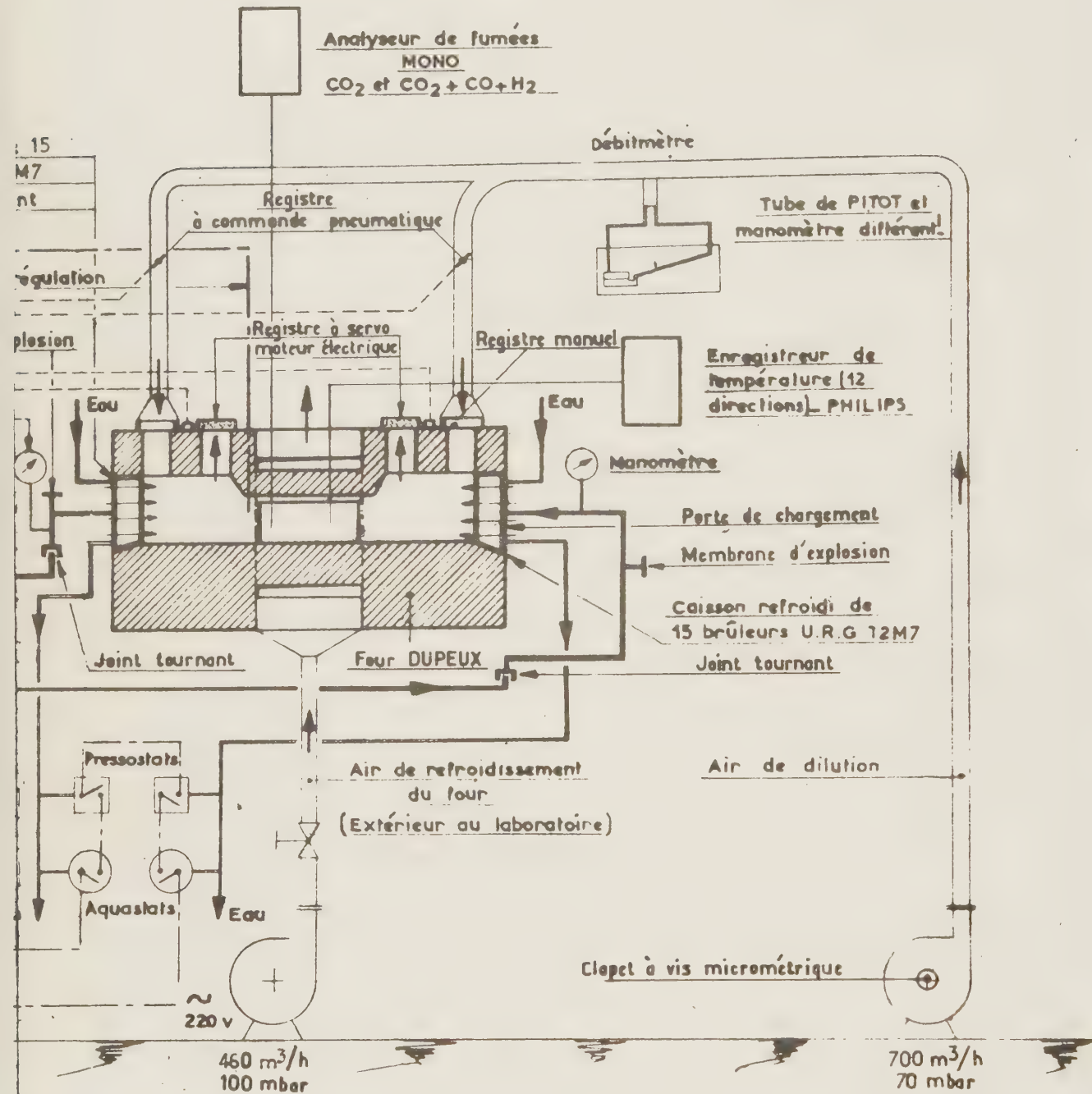
Limite minimale d'allumage et de fonctionnement

-  Circuit propane
-  - air comprimé
-  - prémélange
-  - eau
-  - électrique

POSITIONS VANNE MOTORISEE DE REGULATION

- 1 - Ouverte : régime "tout"
- 2 - Entr'ouverte : régime "peu"
- 3 - Fermée : régime "veilleuse"

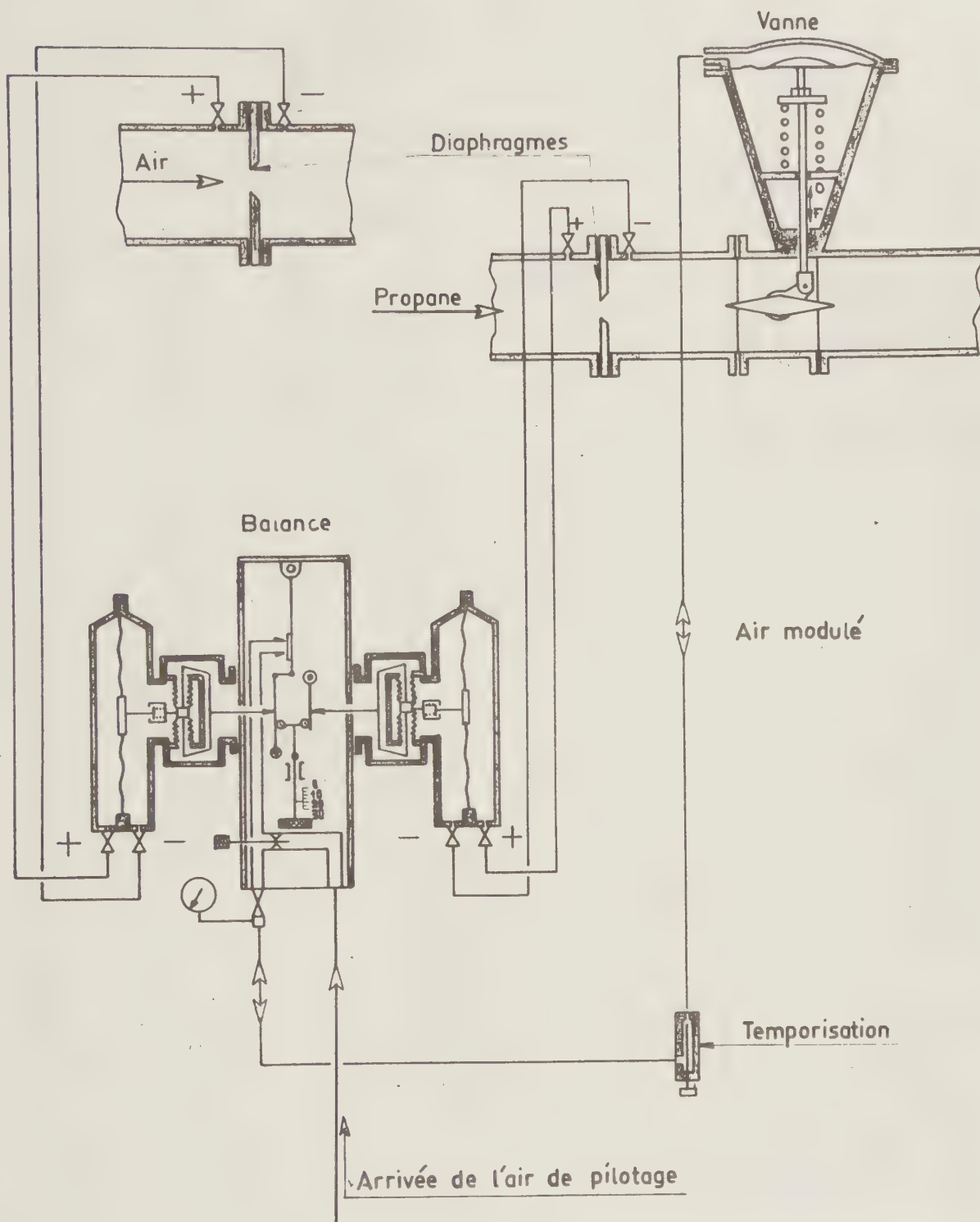




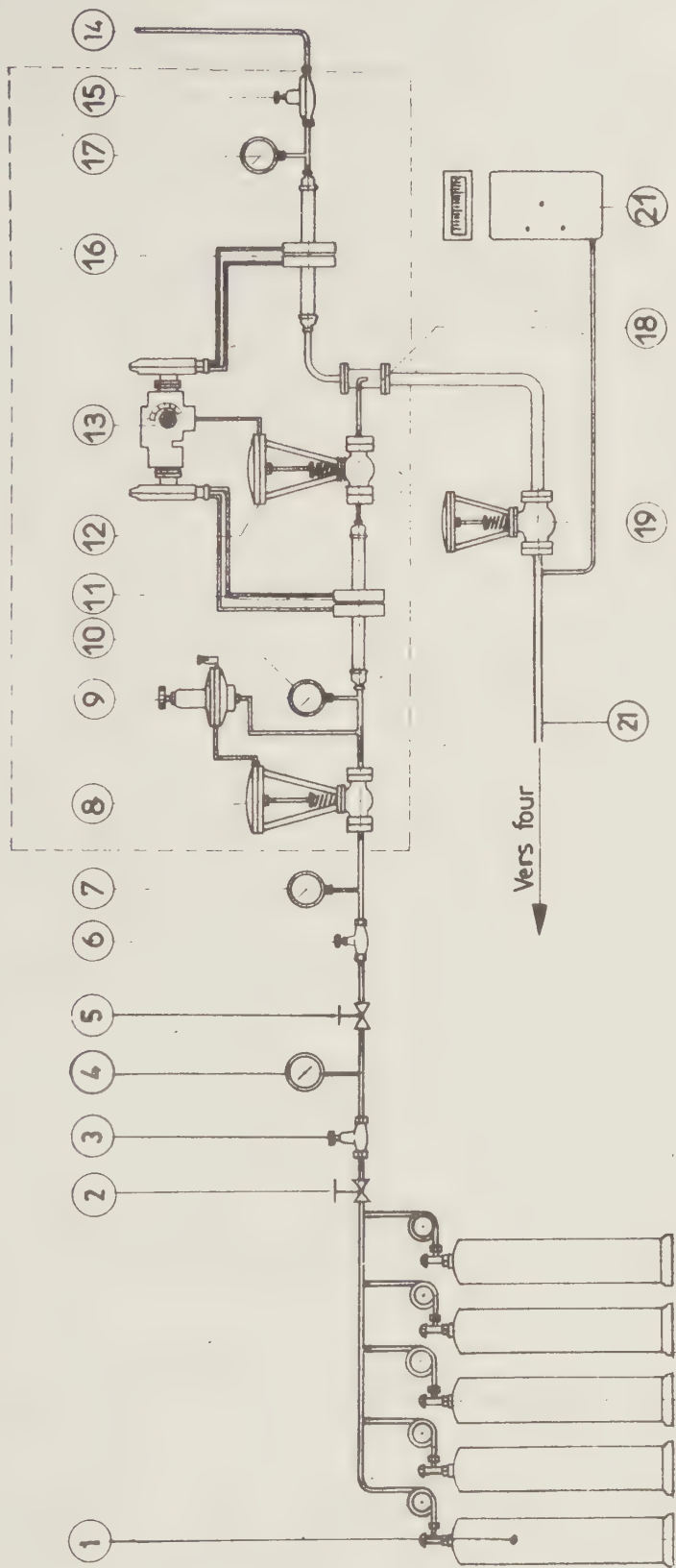
SIMULATEUR DE FOUR A PASSAGE

Schéma de principe

REGULATEUR DE PROPORTIONS



SCHEMA DE L'INSTALLATION DU REGULATEUR DE PROPORTIONS

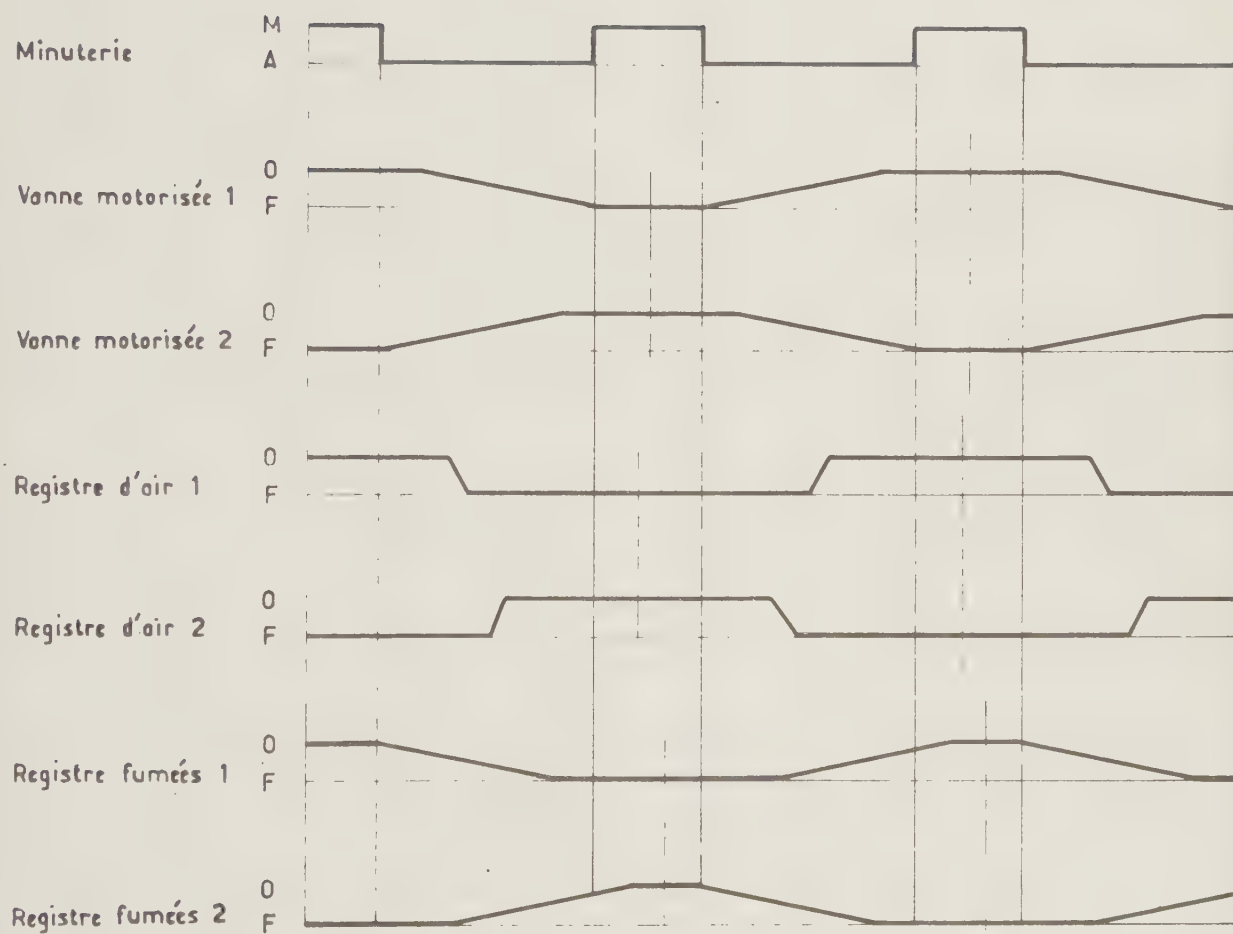


- Stockage de propane
- Vanne générale
- Détendeur
- Manomètre
- Vanne manuelle
- Détendeur
- Pressostat et biseau
- Soupape de commande régulatrice de pression
- Relais BDR 6 ARCA
- Manomètre

- Diaphragme de commande "propane"
- Valve papillon régulatrice de proportions
- Ensemble régulateur de débits proportionnels ARCA (balance)
- Alimentation d'air (5 bars)
- Détendeur
- Diaphragme de commande "air"
- Manomètre
- Tube mélangeur
- Soupape de commande du débit
- Alimentation four
- Analyseur de gaz

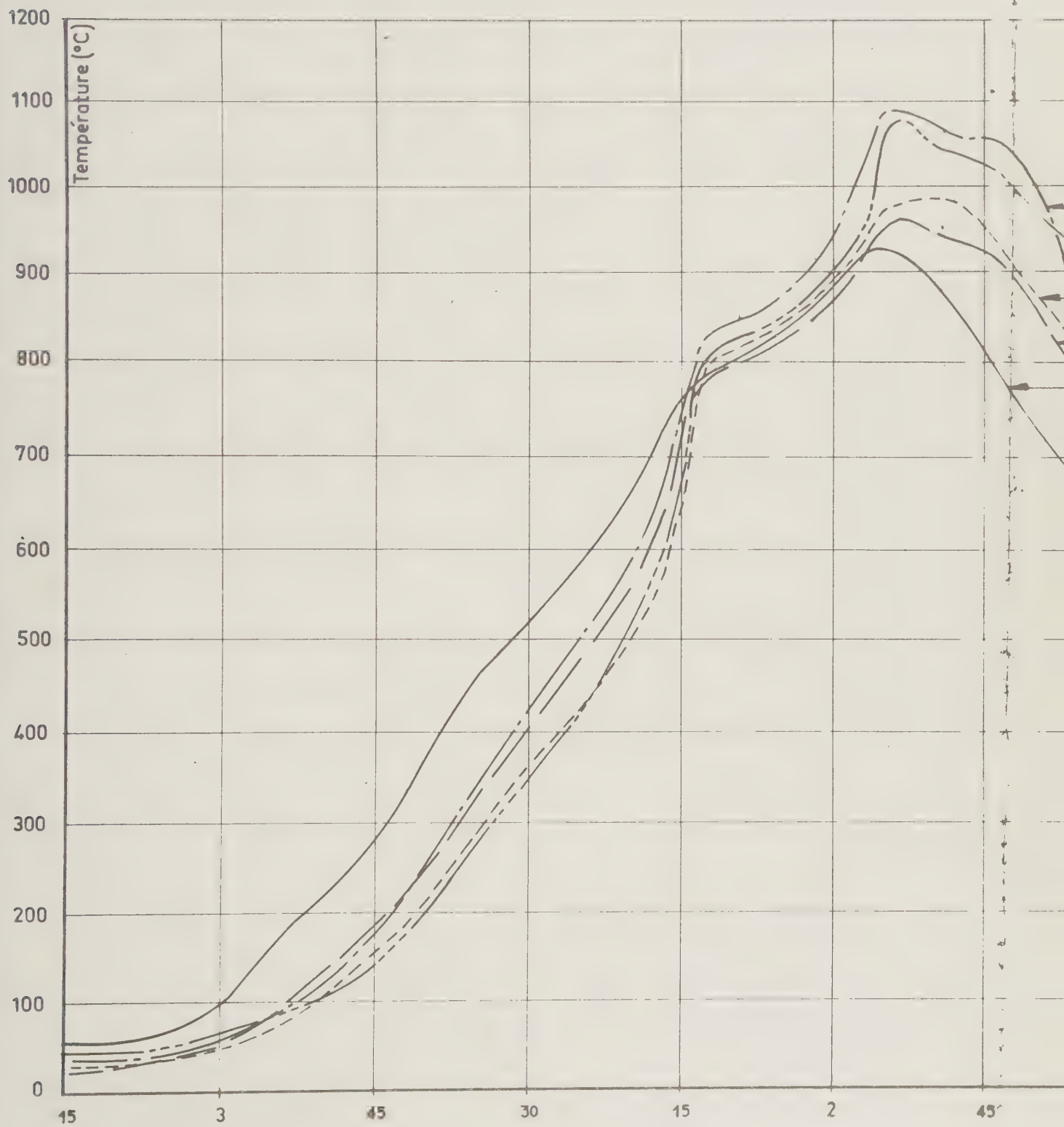
DISTRIBUTEUR DES CIRCUITS FLUIDES

Diagramme séquentiel

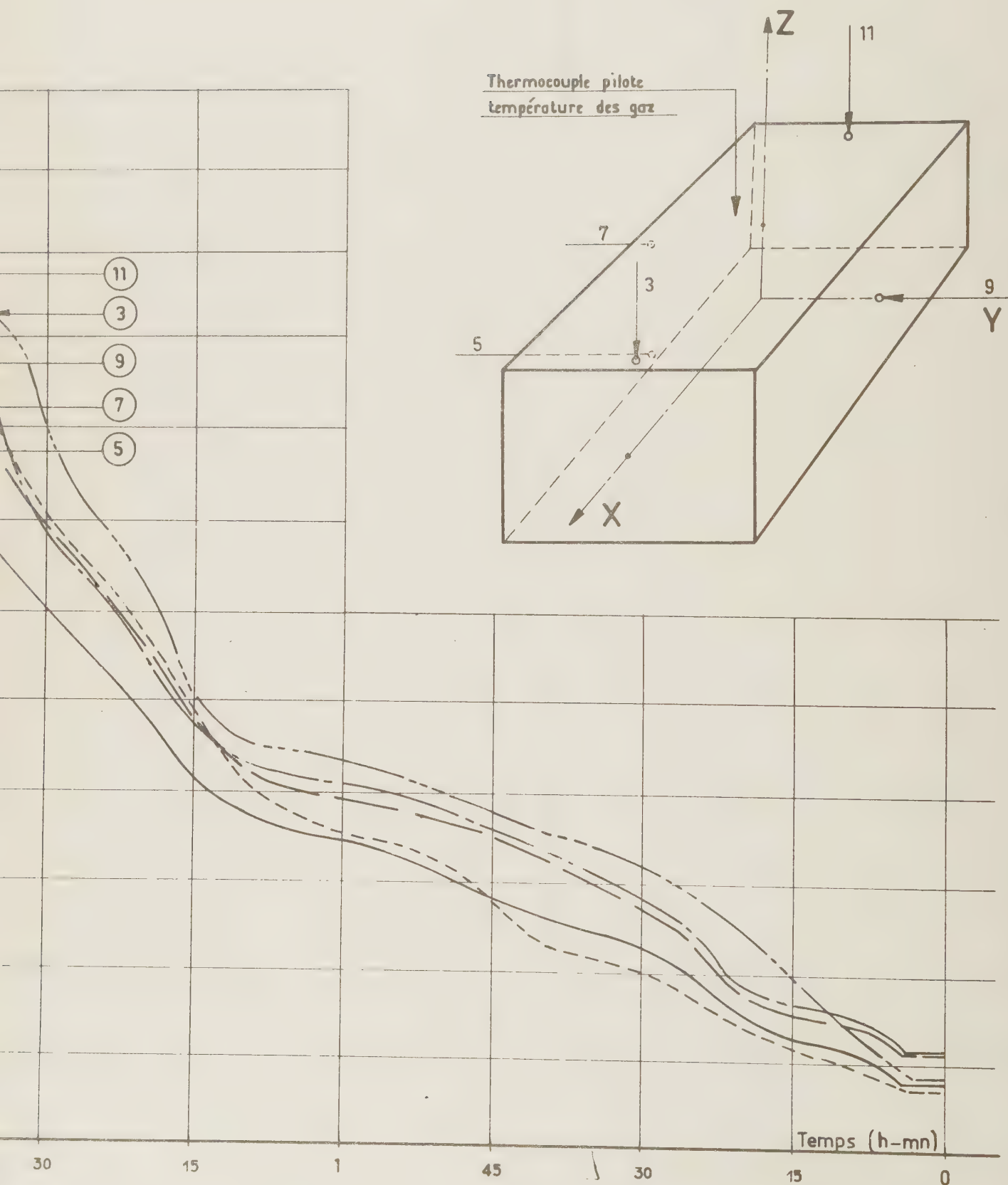


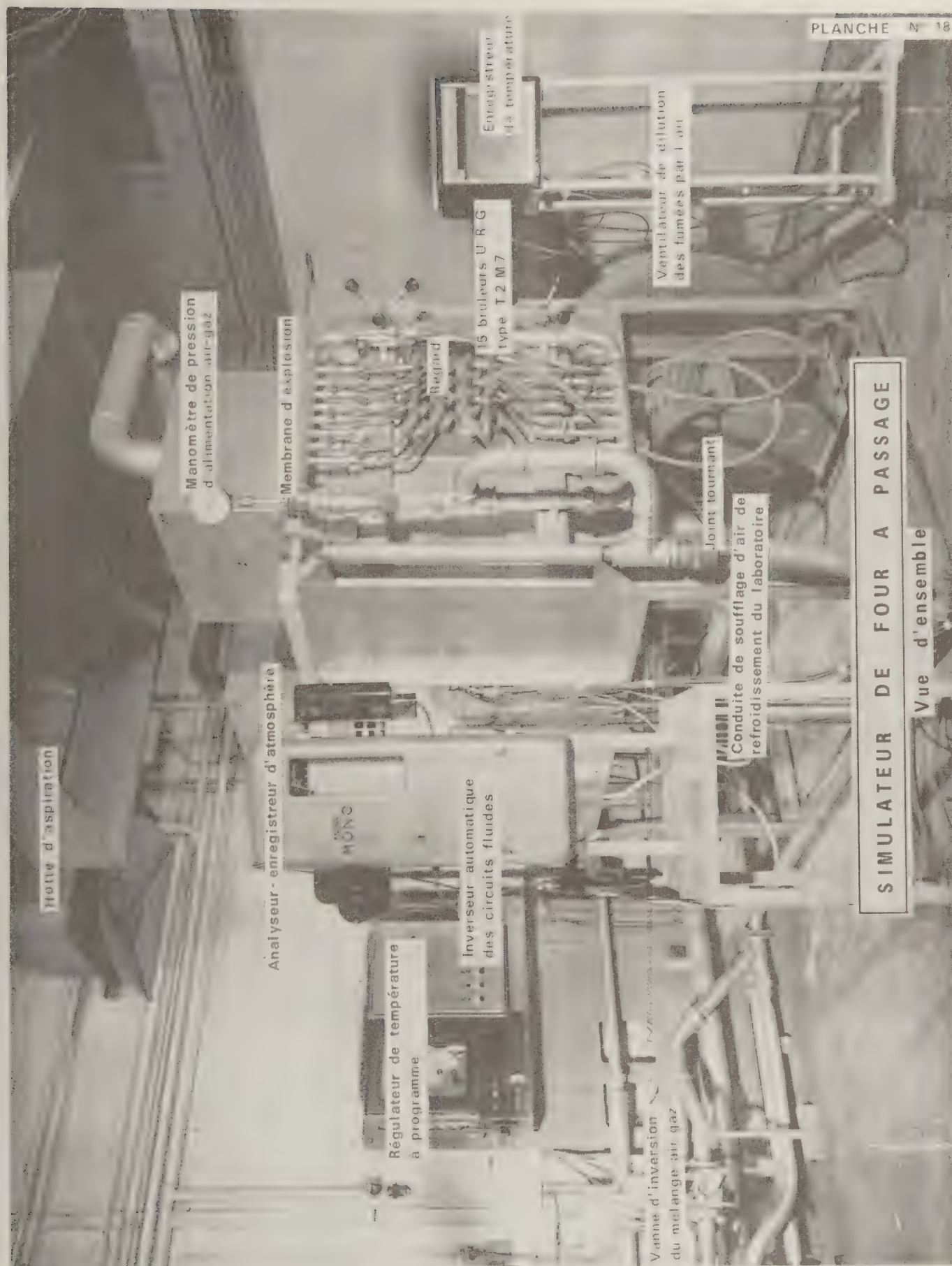
ESSAI PRELIMINAIRE

Cuisson d'une brique creuse



DISPOSITION DES THERMOCOUPLES





Hotte d'aspiration

Manomètre de pression
d'alimentation air-gaz

Membrane d'explosion

Analyseur - enregistreur d'atmosphère

Régulateur de température
à programme

Inverseur automatique
des circuits fluides

15 brûleurs URG
type T2 M7

Enregistreur
de température

Vanne d'inversion
du mélange air-gaz

Joint tournant

Conduite de soufflage d'air de
refroidissement du laboratoire

Ventilateur de dilution
des fumées par l'air

SIMULATEUR DE FOUR A PASSAGE

Vue d'ensemble

EXPERIMENTATION

Mode opératoire

Chauffage

Fig.1

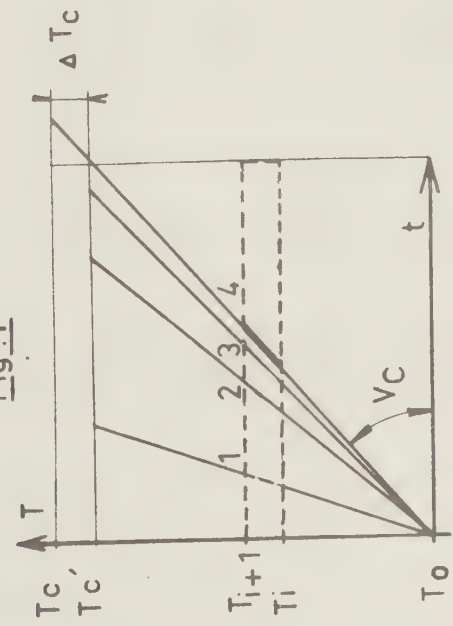


Fig.2

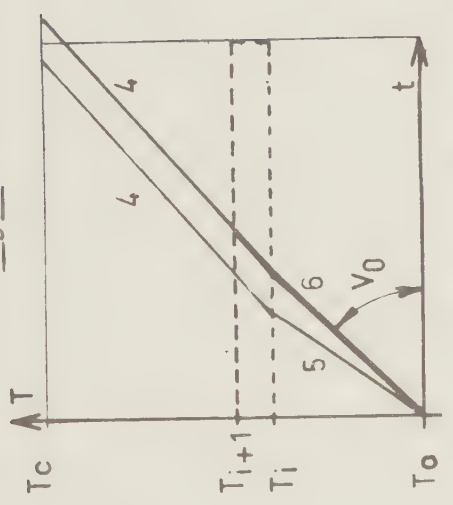


Fig.3

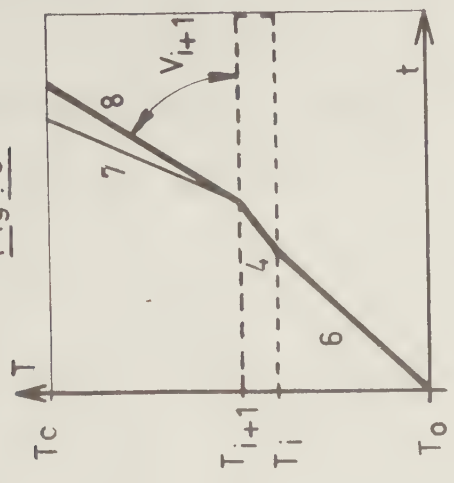


Fig.4

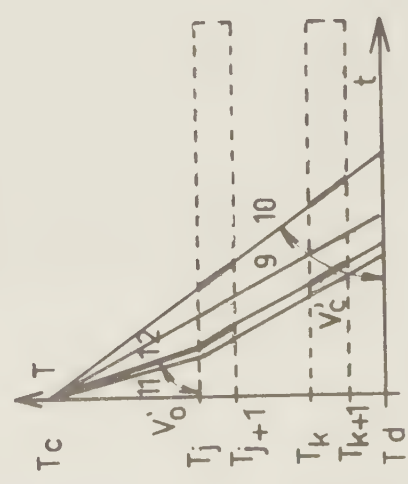


Fig.5

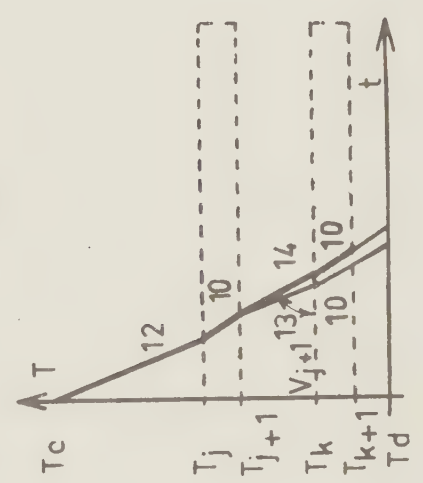
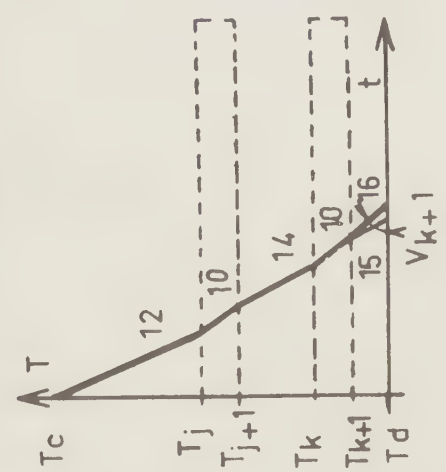


Fig : 6



CARREAL

Fig.1_ Courbe dilatation - retrait

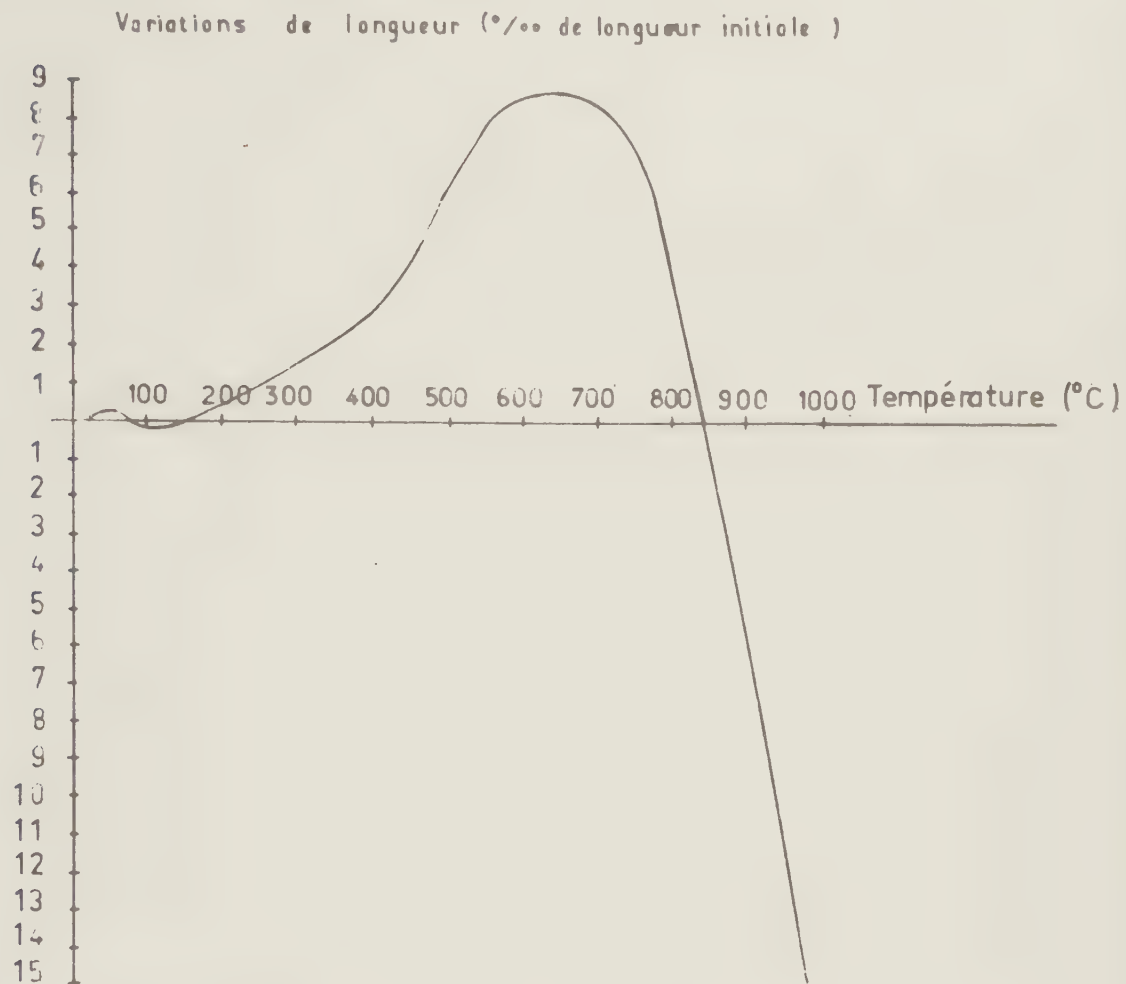
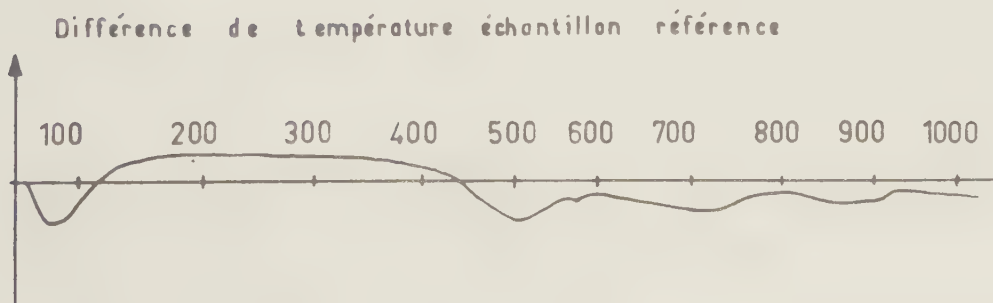


Fig 2. Analyse thermique différentielle



BRIQUE

Fig.1 - Courbe dilatation - retrait

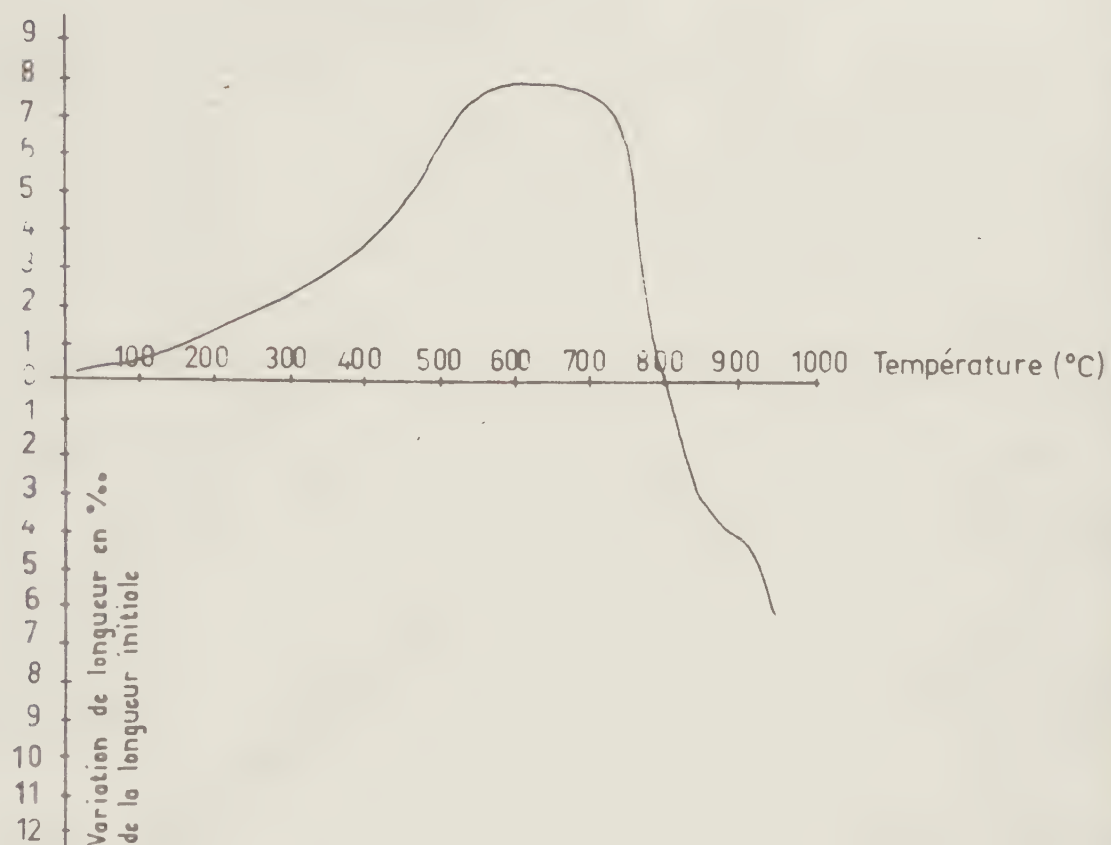
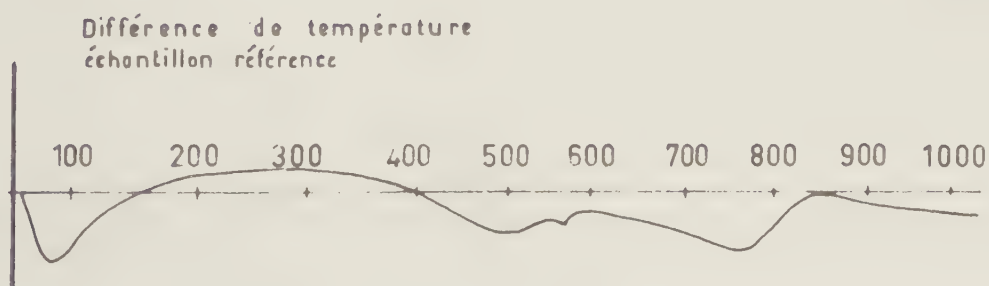
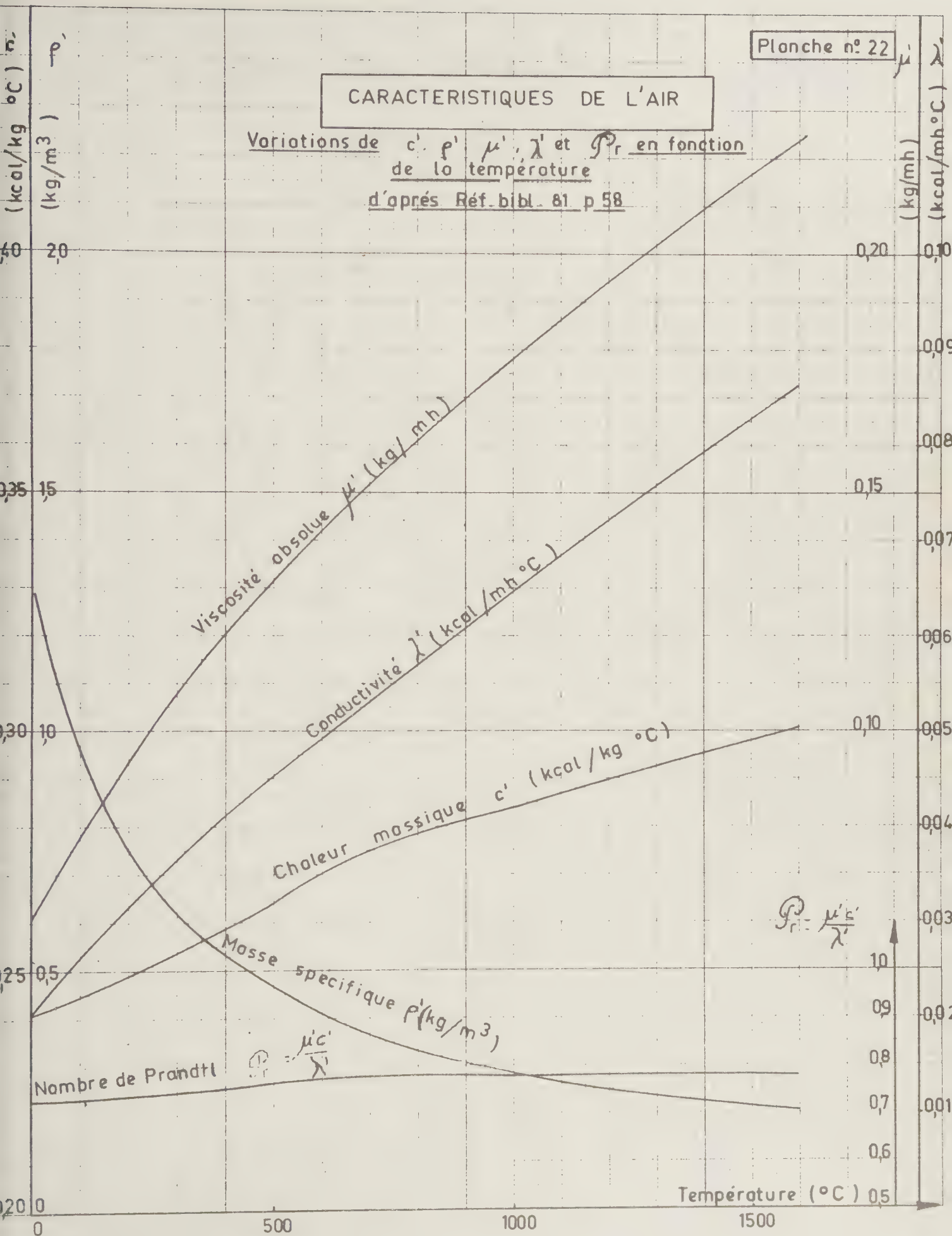


Fig 2. Courbe d'analyse thermique différentielle



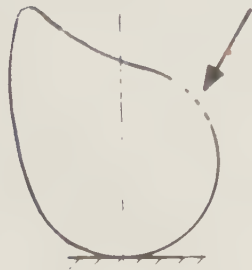
CARACTERISTIQUES DE L'AIR

Variations de c' , ρ' , μ' , λ' et Pr en fonction de la température
d'après Réf. bibl. 81 p 58

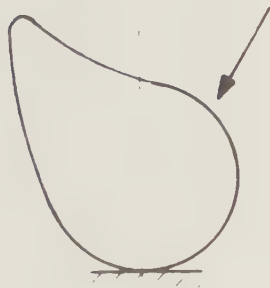


Carreau : indicatrice de réflexion - incidence 30°

Côté poli



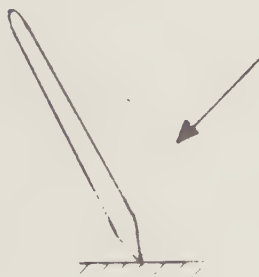
2μ



4μ

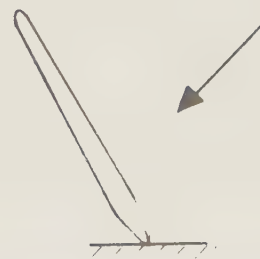
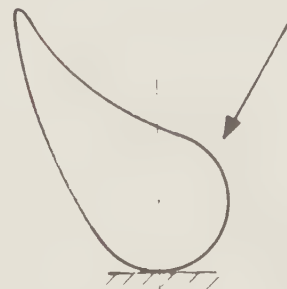
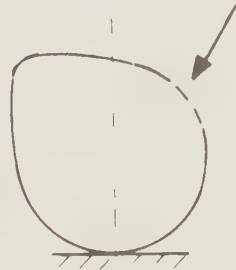


6μ



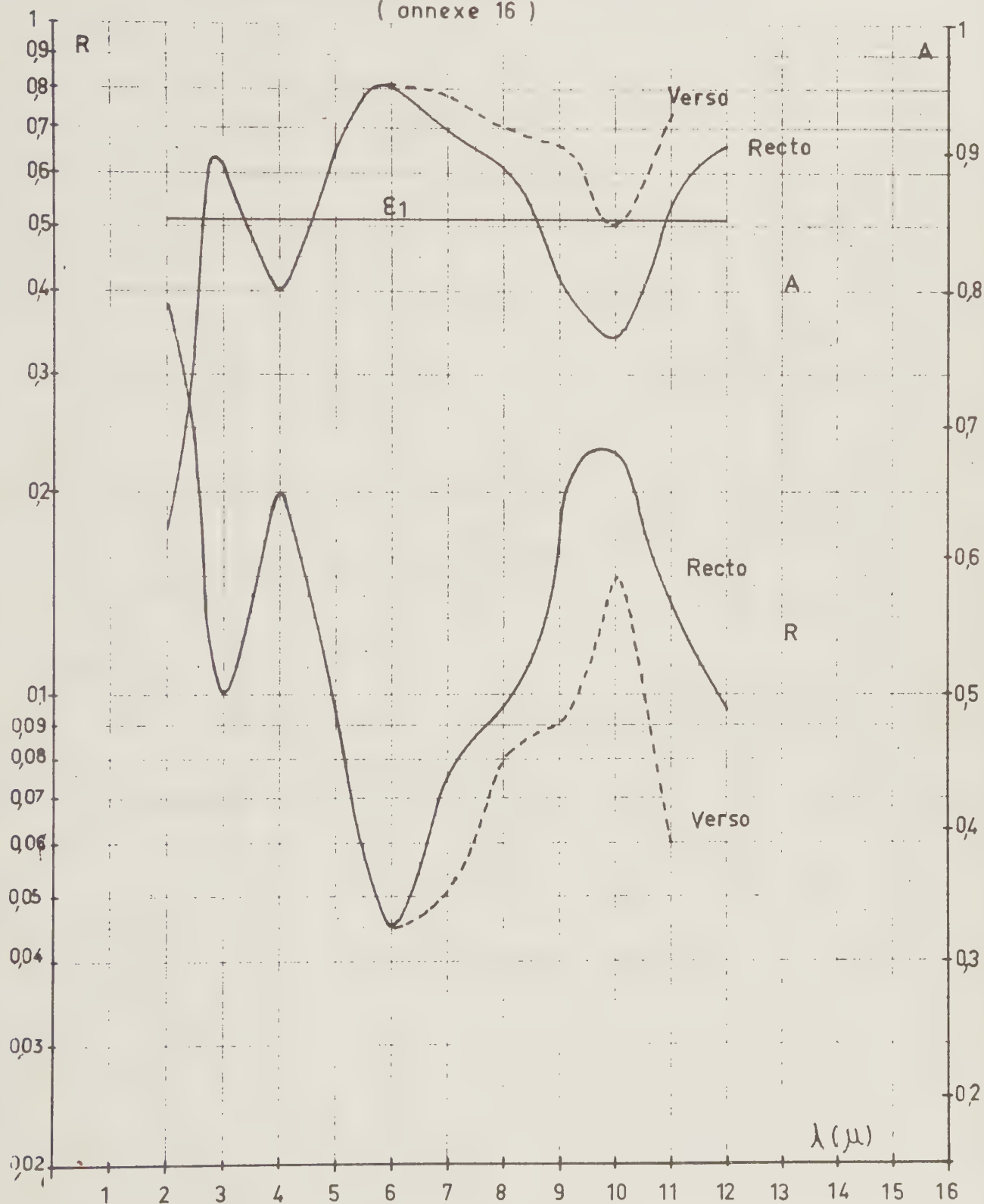
$8,8\mu$

Côté rugueux

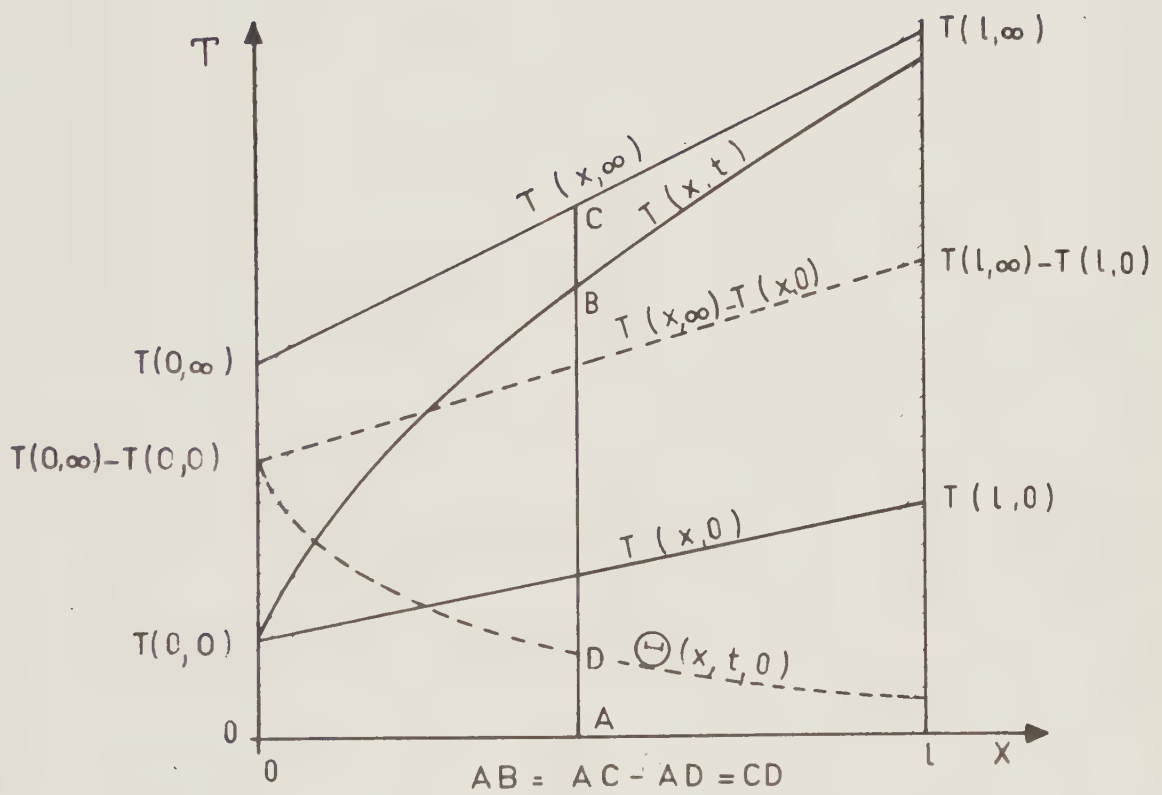


10μ

Carreau : Variations des facteurs de réflexion hémisphérique R et d'émission A
 en fonction de la longueur d'onde à $T=300^\circ \text{ K}$
 (annexe 16)



REPRESENTATION GRAPHIQUE DU THEOREME 1 §4.221

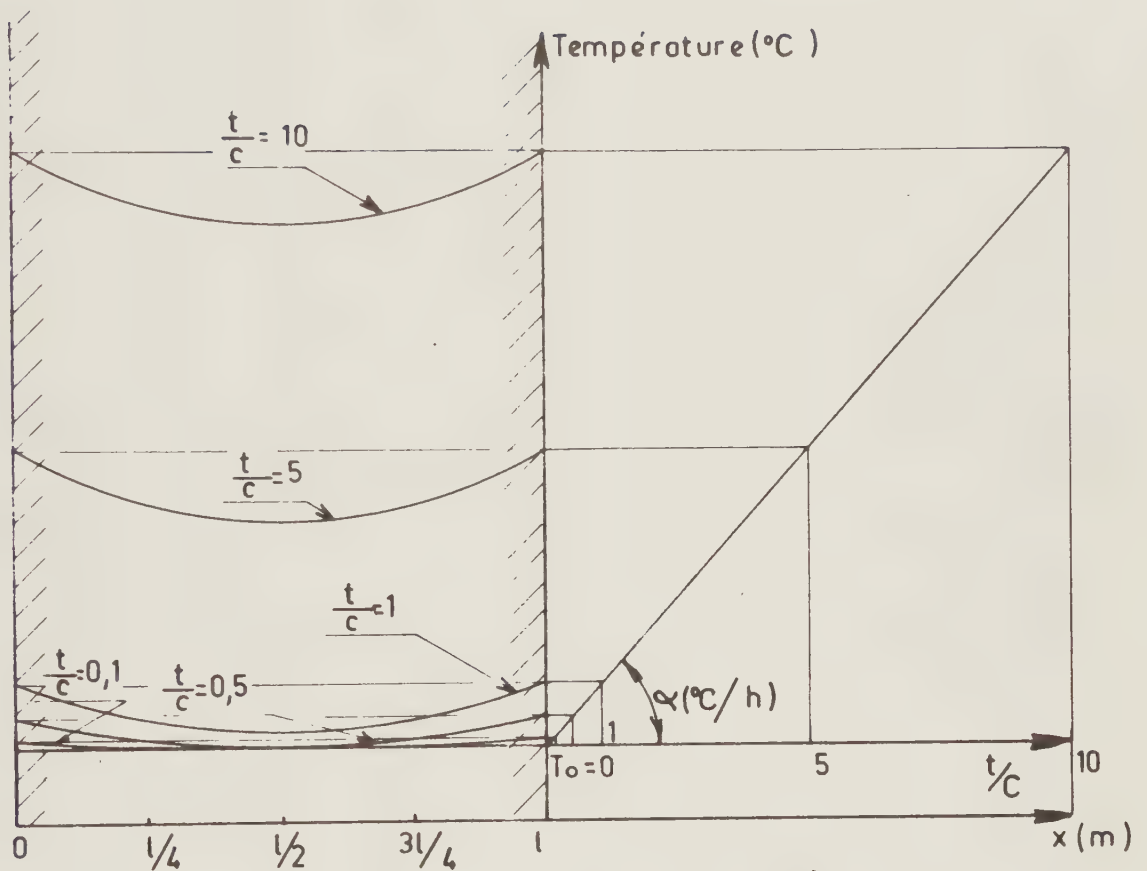


$$T(x, t) = T(x, \infty) - \Theta(x, t, 0)$$

REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA FONCTION

Planche n°26

$$T(x,t) = T_0 + \alpha t - \frac{4\alpha C}{\pi} \sin \frac{\pi x}{l} \left(1 - e^{-\frac{t}{C}} \right)$$

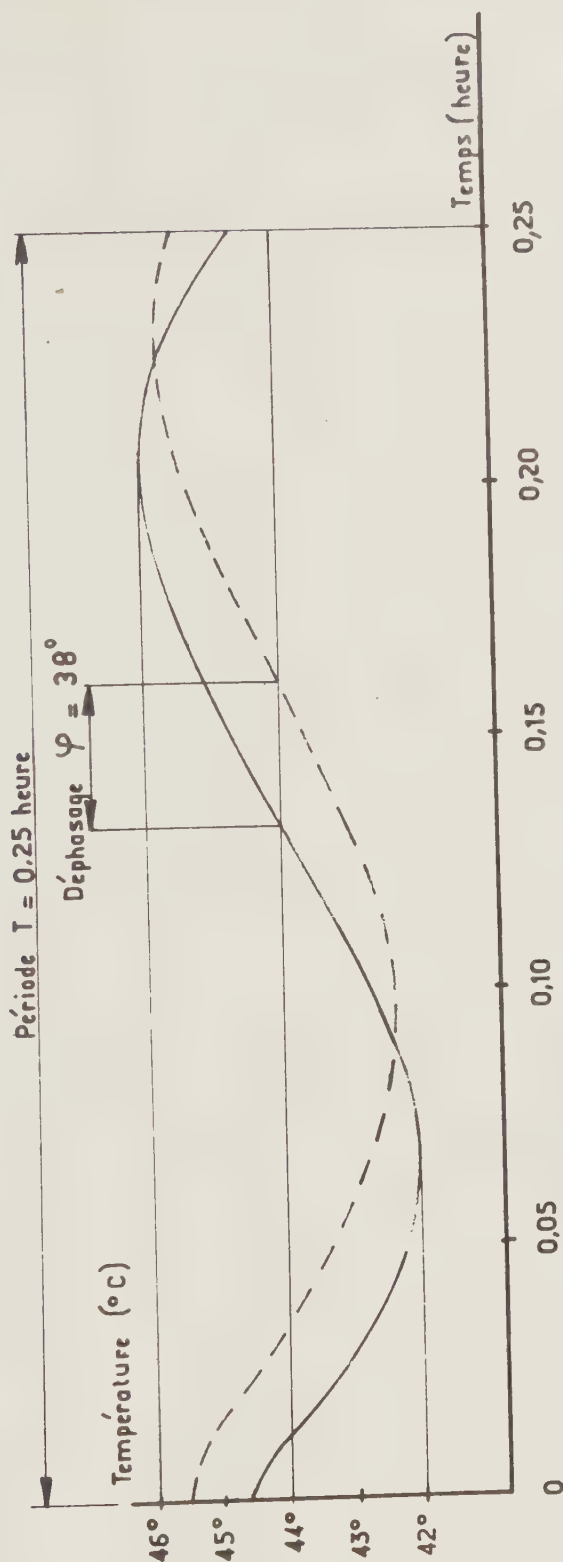


Calcul de la fonction $y(x,t) = 10 \sin \frac{\pi x}{l} (1 - e^{-\frac{t}{C}})$

$\frac{t}{C}$	$e^{-\frac{t}{C}}$	$1 - e^{-\frac{t}{C}}$	$y(t, \frac{l}{4})$	$y(t, \frac{l}{2})$
0,10	0,905	0,095	0,67	0,95
0,50	0,608	0,392	2,77	3,92
1,00	0,368	0,632	4,47	6,32
5,00	0,007	0,993	7,00	9,93
10,00	0,000	0,999	7,07	9,99

MESURE DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE
PAR LA METHODE DU SIGNAL PERIODIQUE

Terre cuite : carreau
(annexe .17)



$$\text{Pulsation } \omega = \frac{2\pi}{T} = 25,1 \text{ heure}^{-1}$$

$$\text{Demi-épaisseur } x_0 = 0,009 \text{ m}$$

$$\text{Déphasage } \lg \phi = 0,79$$

$$\text{Diffusivité } a = \frac{\omega x_0^2}{2 \lg \phi} + b x_0^6 = (1,30 + 0,14) \times 10^{-3} = 1,44 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$$

$$Nu = 0,323 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

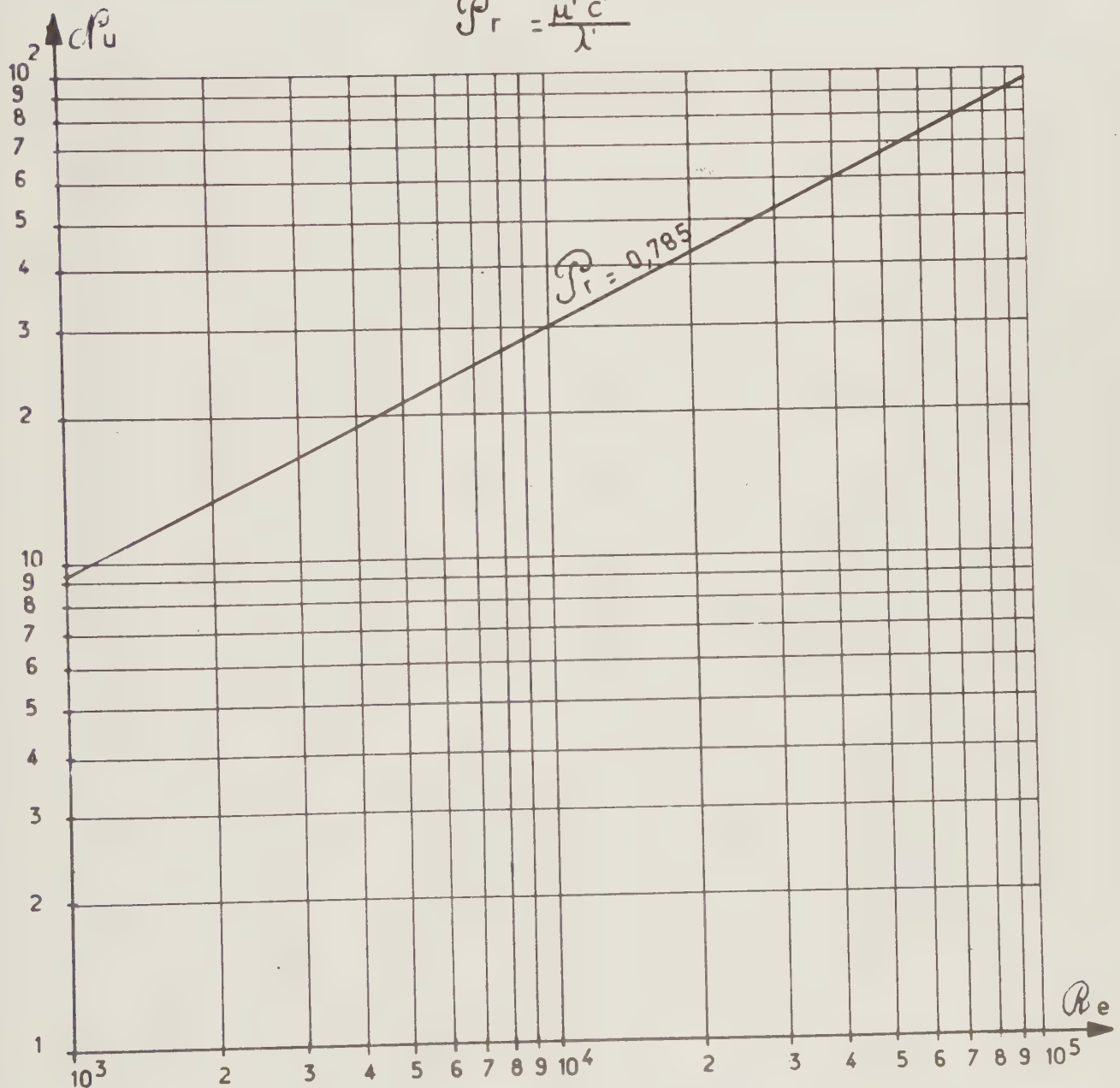
Rét. bibl. 86 p 148

Représentation graphique

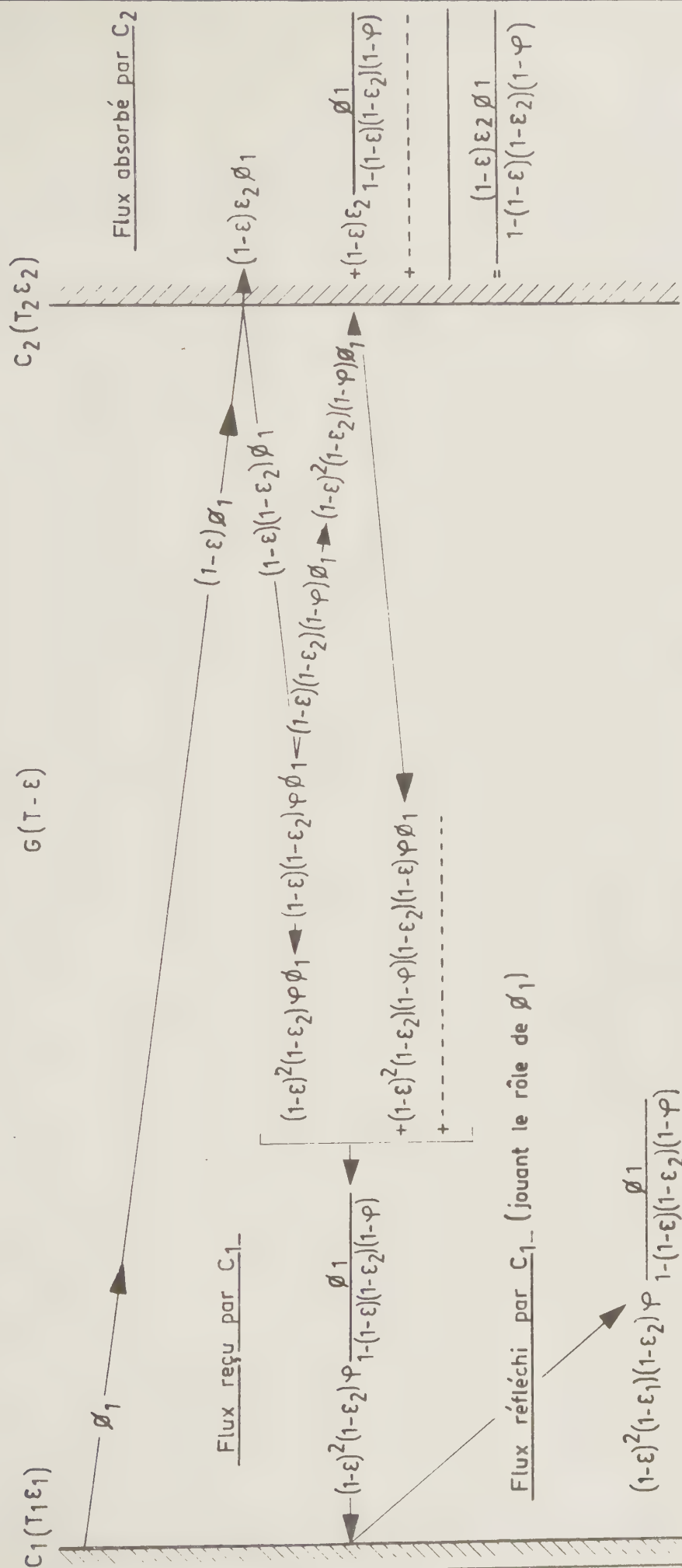
$$Nu = \frac{h L}{\lambda}$$

$$Re = \frac{V L \rho'}{\mu'}$$

$$Pr = \frac{\mu' c'}{\lambda'}$$

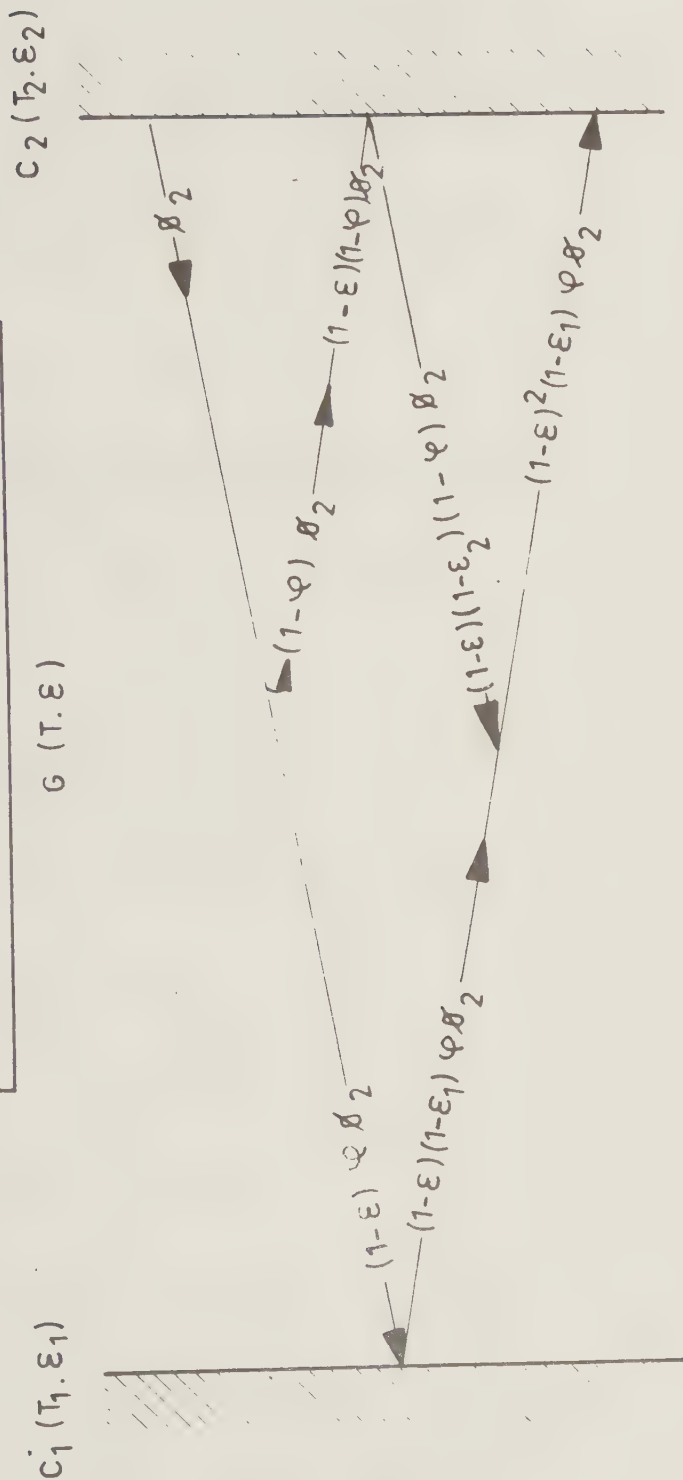


SCHEMA DU RAYONNEMENT DE C1 VERS C2



$$\text{Flux échangé } \varnothing_{1-2} : (1-\varepsilon)\varepsilon_2 \frac{\varnothing_1}{1-(1-\varepsilon)(1-\varepsilon_2)(1-\varphi)} = \frac{\varepsilon_2(1-\varepsilon)\varnothing_1}{1-(1-\varepsilon)(1-\varepsilon_2)(1-\varphi) - (1-\varepsilon)^2(1-\varepsilon_1)(1-\varepsilon_2)\varphi}$$

SCHEMA DU RAYONNEMENT DE C₂ VERS C₁



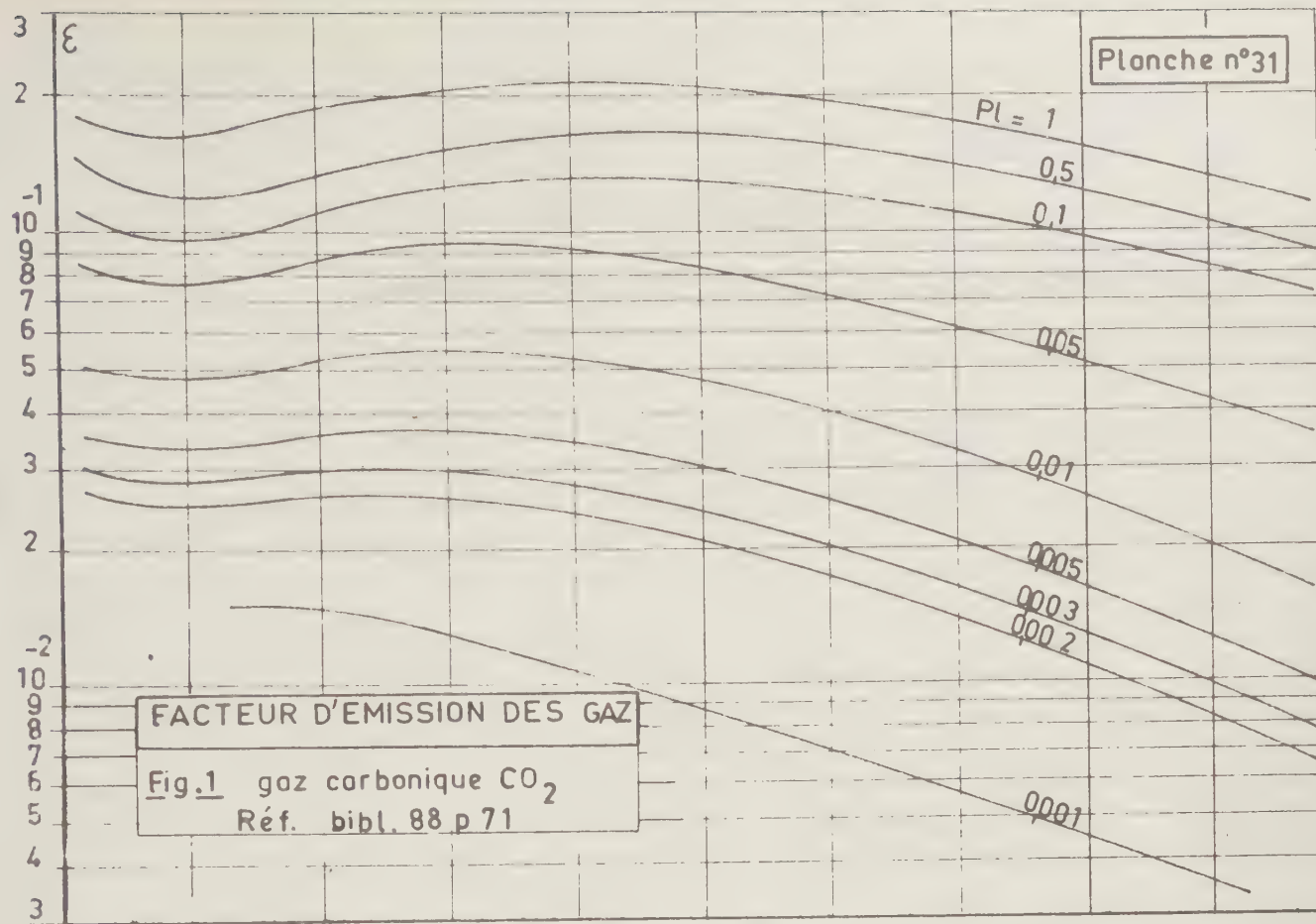
Flux absorbé par C₁ : $(1-\epsilon)\epsilon_1\varphi \frac{\delta_2}{1-(1-\epsilon)^2(1-\epsilon_1)(1-\varphi)}$

Flux émis par C₂ après réflexions sur C₂ : $\frac{\delta_2}{1-(1-\epsilon)(1-\epsilon_2)(1-\varphi)}$

Flux réfléchi par C₁ : $(1-\epsilon)(1-\epsilon_1)\varphi \frac{\delta_2}{1-(1-\epsilon)^2(1-\epsilon_1)(1-\varphi)}$

Flux émis par C₂ après réflexions sur C₂ : $\frac{(1-\epsilon)^2(1-\epsilon_1)(1-\epsilon_2)\varphi\delta_2}{1-(1-\epsilon)(1-\epsilon_2)(1-\varphi)}$

Flux échangé δ₂₋₁ : $(1-\epsilon)\epsilon_1\varphi \frac{\delta_2}{1-(1-\epsilon)(1-\epsilon_2)(1-\varphi)} \times \frac{1}{1-\frac{(1-\epsilon)^2(1-\epsilon_1)(1-\epsilon_2)\varphi}{1-(1-\epsilon)(1-\epsilon_2)(1-\varphi)}} = \frac{(1-\epsilon)\epsilon_1\varphi\delta_2}{1-(1-\epsilon)(1-\epsilon_2)(1-\varphi)}$



FACTEUR D'EMISSION DES GAZ
 Fig.1 gaz carbonique CO_2
 Réf. bibl. 88 p 71

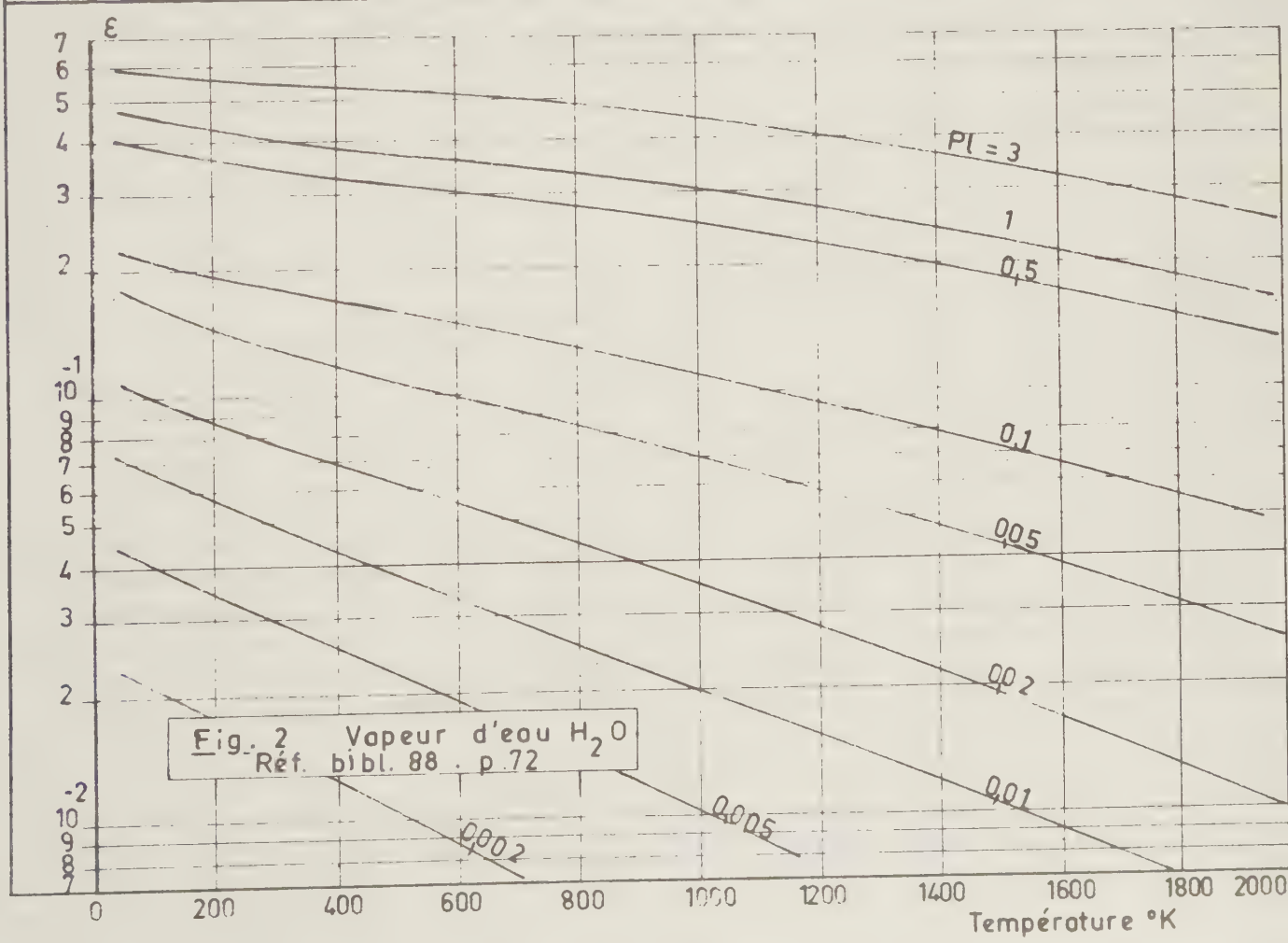


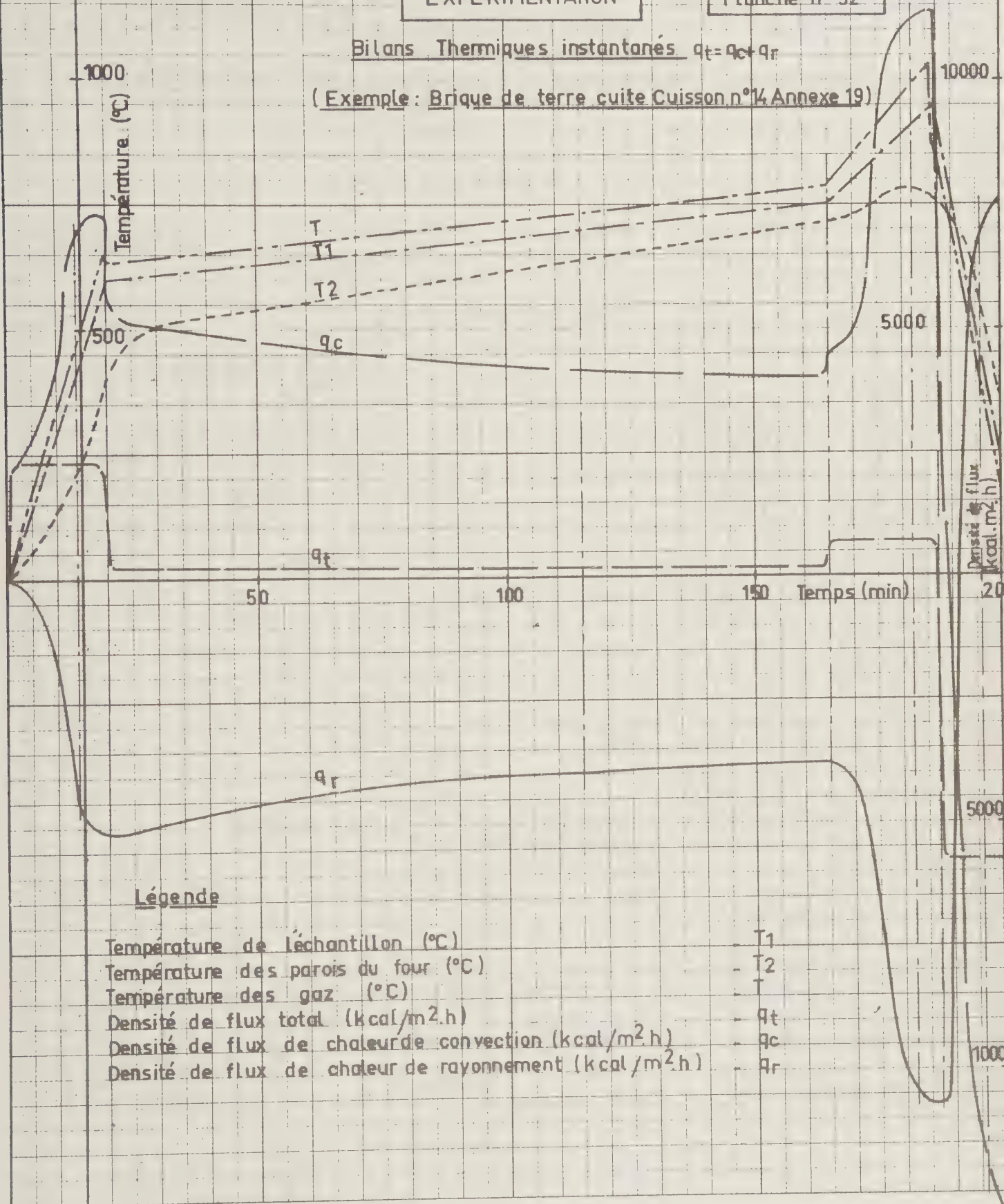
Fig. 2 Vapeur d'eau H_2O
 Réf. bibl. 88 p 72

EXPERIMENTATION

Planche n° 32

Bilans Thermiques instantanés $q_t = q_c + q_r$

(Exemple : Brique de terre cuite Cuisson n°14 Annexe 19)



Représentation des échantillons et positions des thermocouples

Fig. 1 Correau

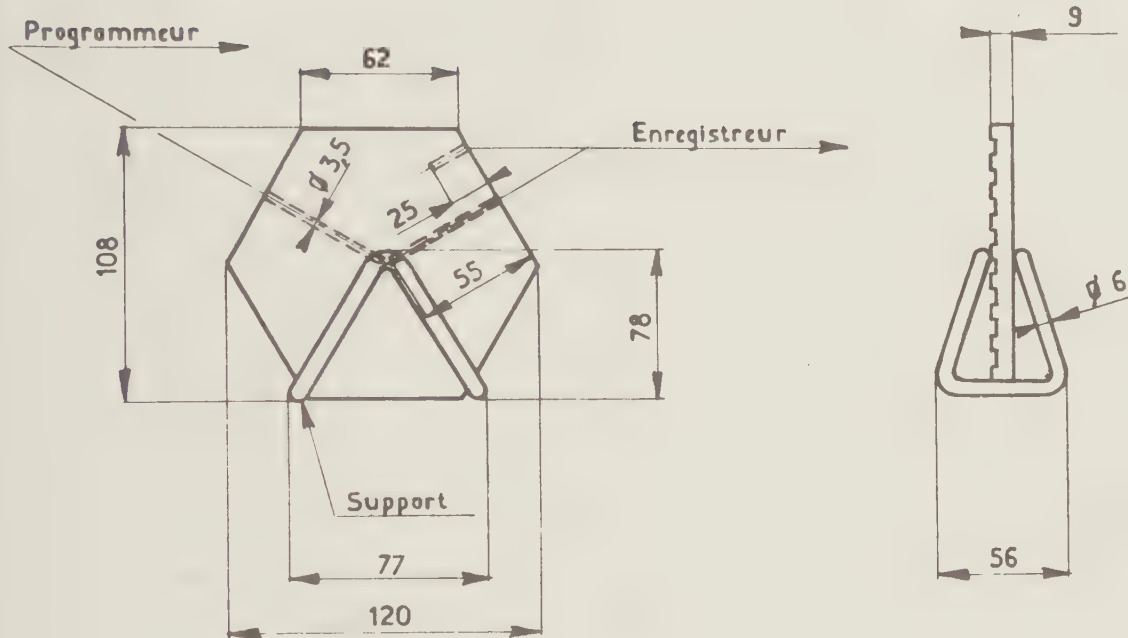
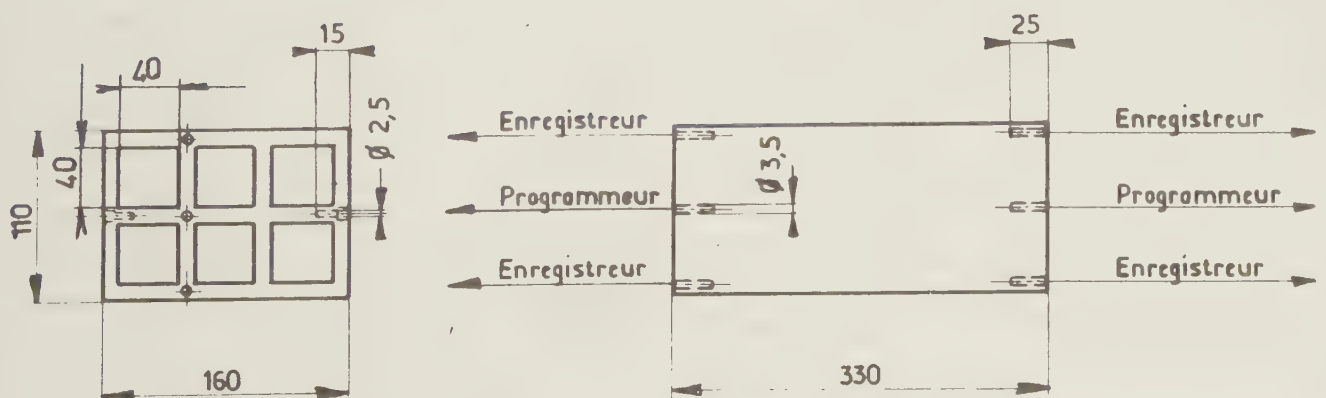


Fig. 2. Brique creuse



Courbes optimales de cuisson

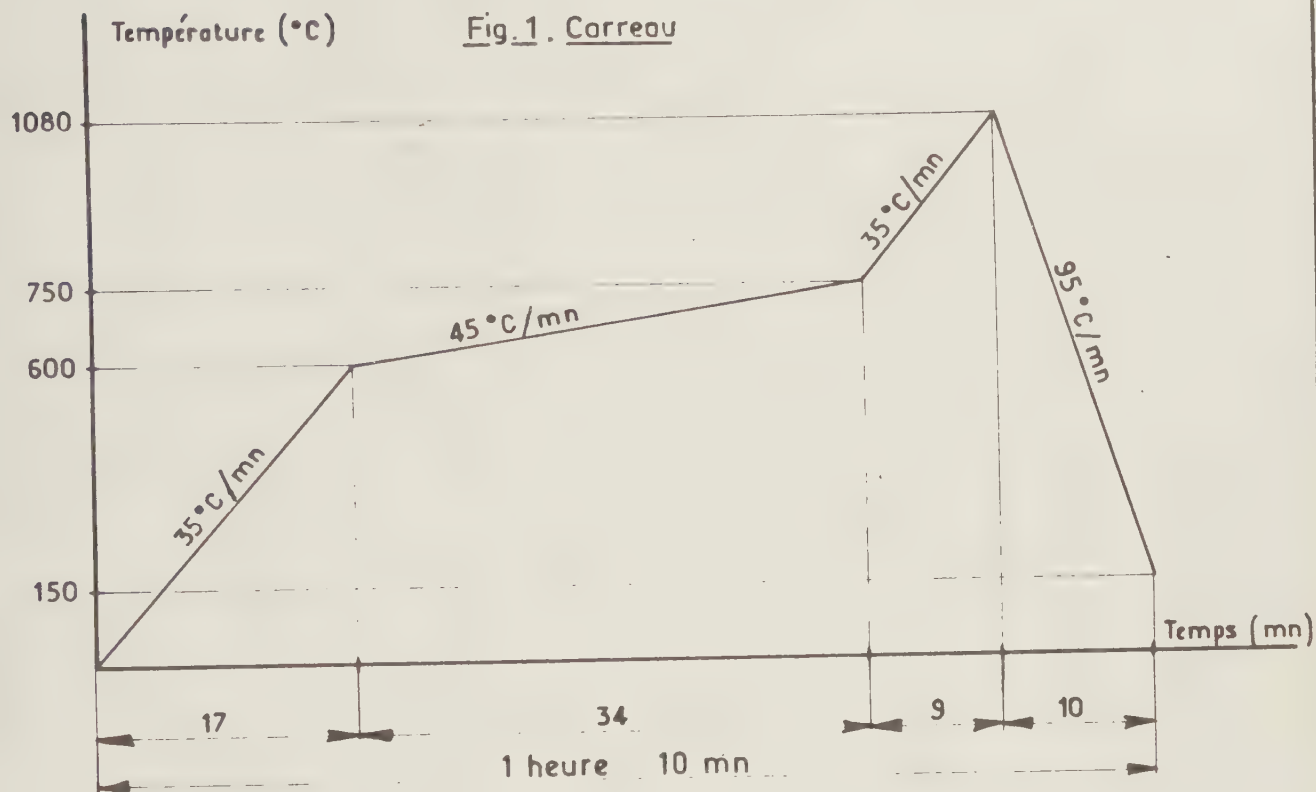
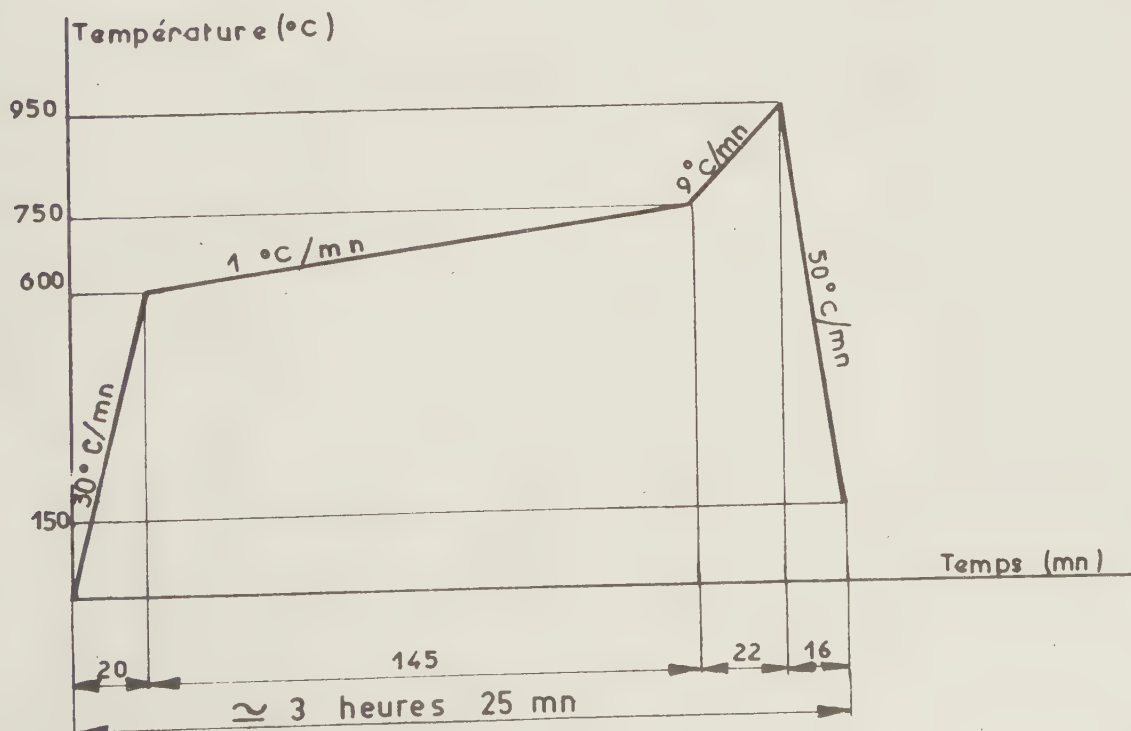
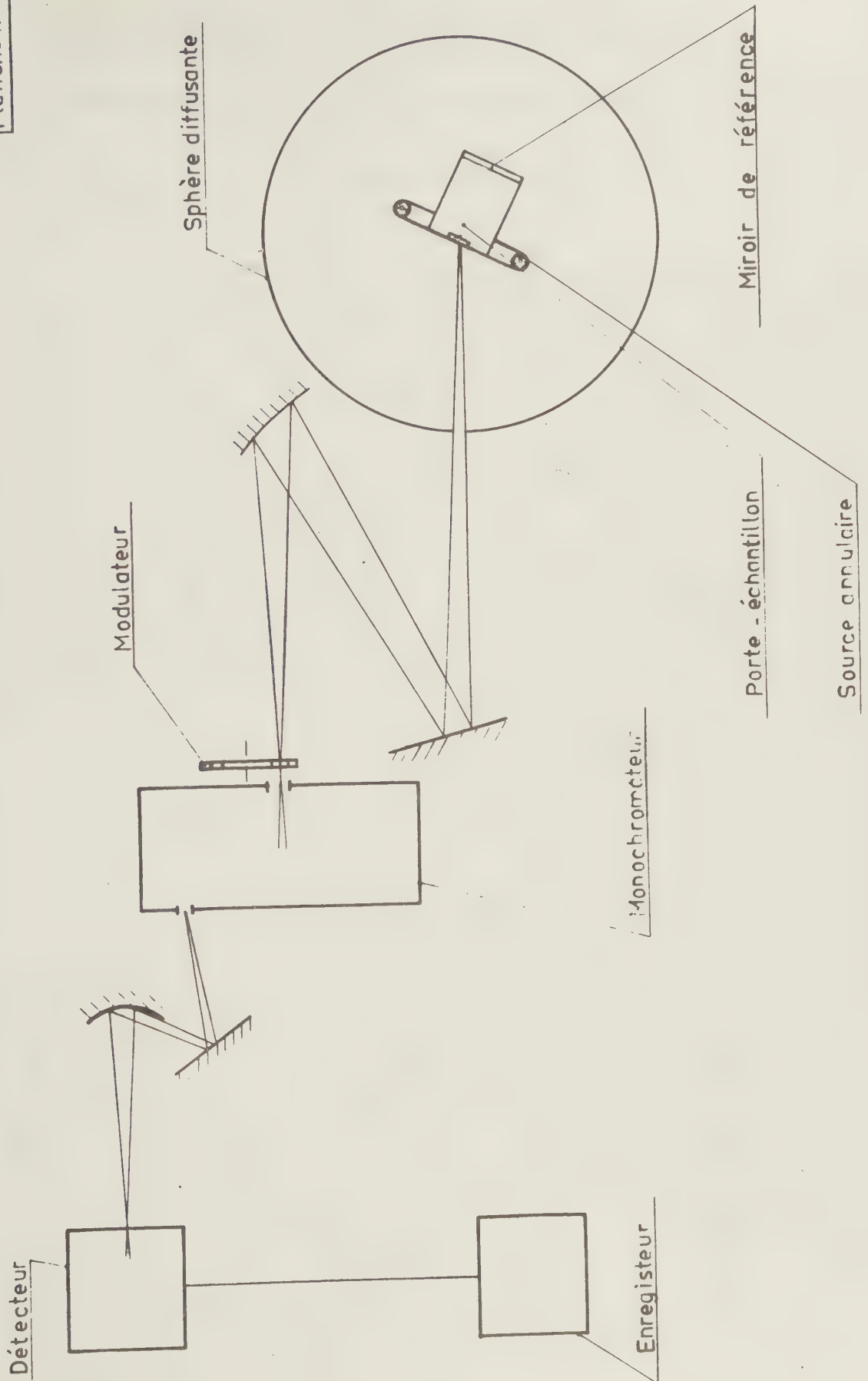


Fig. 2. Brique



MESURE DU FACTEUR DE REFLEXION HEMISPHERIQUE MONOCHROMATIQUE

Planche n° 35



EXPÉRIMENTATION SUR FAÏENCE ET SUR GRÈS

Représentation des échantillons et positions des thermocouples

Fig. 1

Assiette de faïence

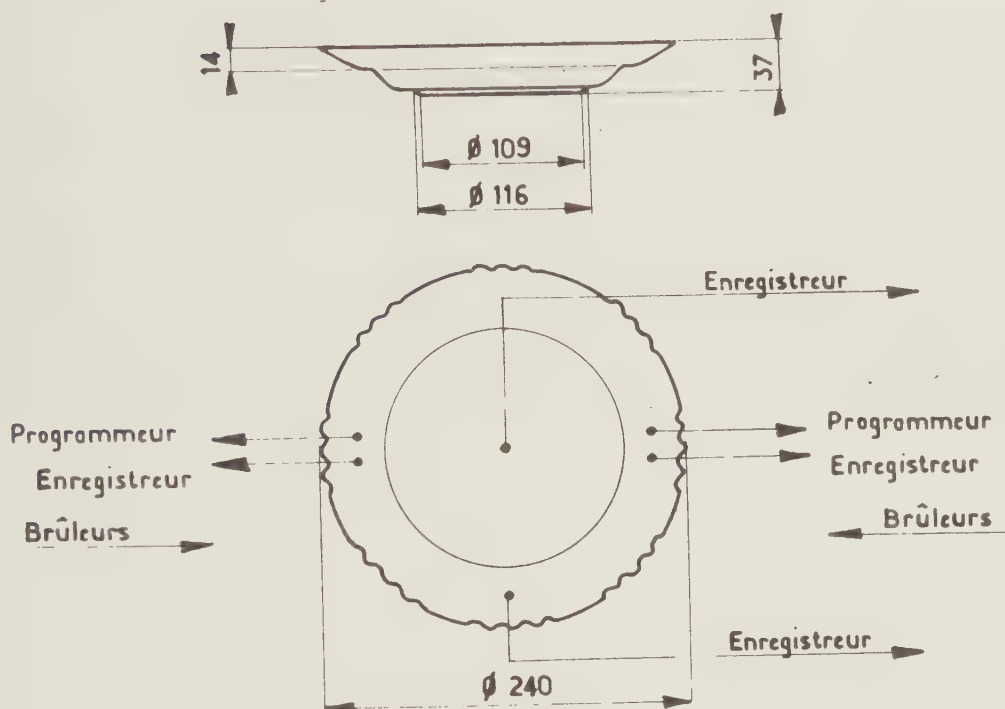
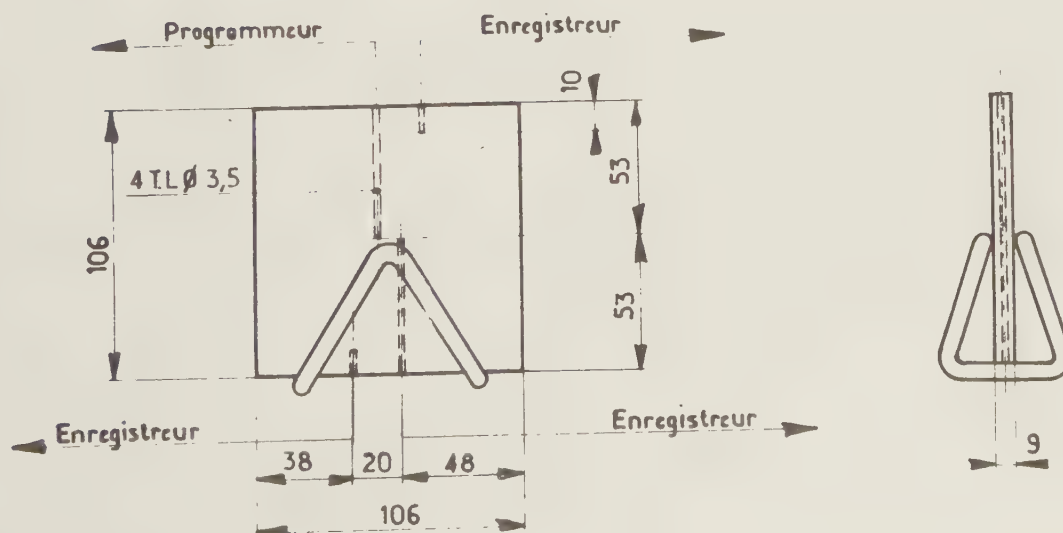


Fig. 2

Carreau de grès



EXPÉRIMENTATION SUR FAÏENCE

Fig. 1 Courbe de dilatation - retrait

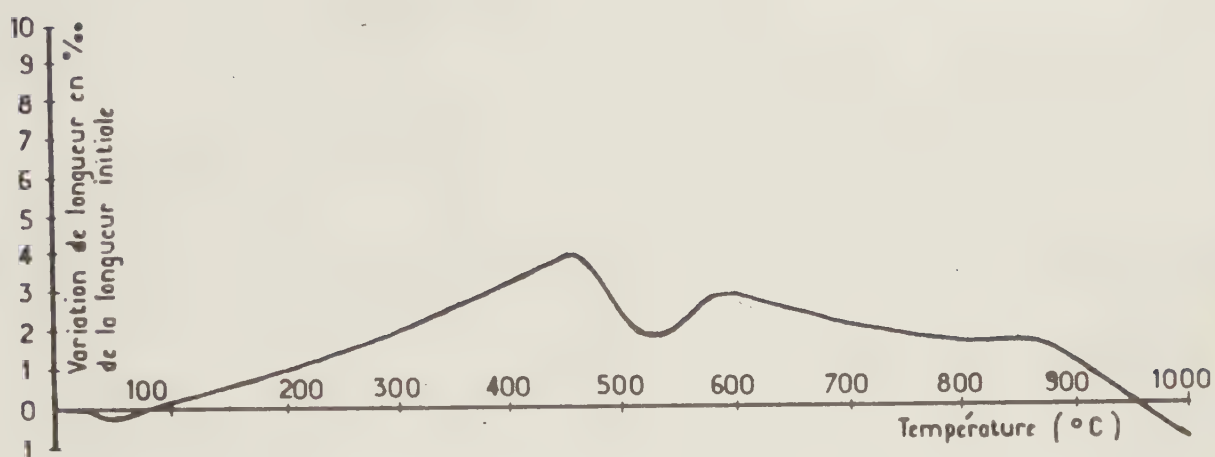
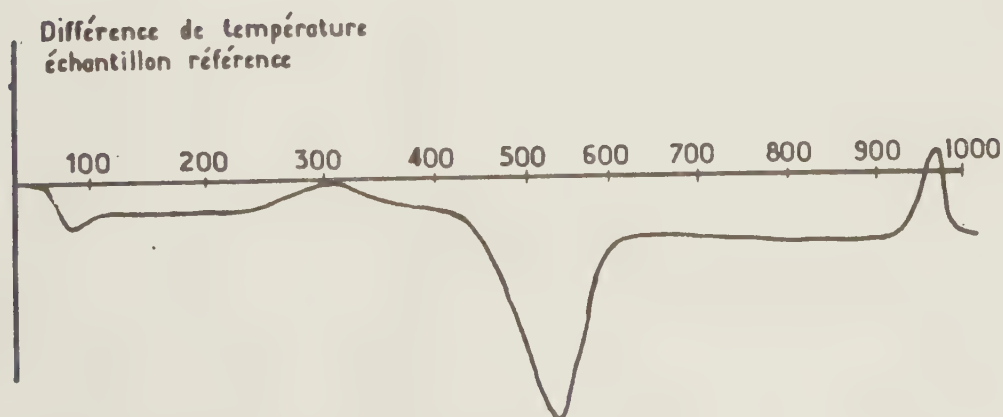


Fig. 2 Courbe d'analyse thermique différentielle



EXPÉRIMENTATION SUR FAÏENCE ET SUR GRÈS

Courbes optimales de cuisson

Fig. 1 Assiette de faïence - cuisson de biscuit

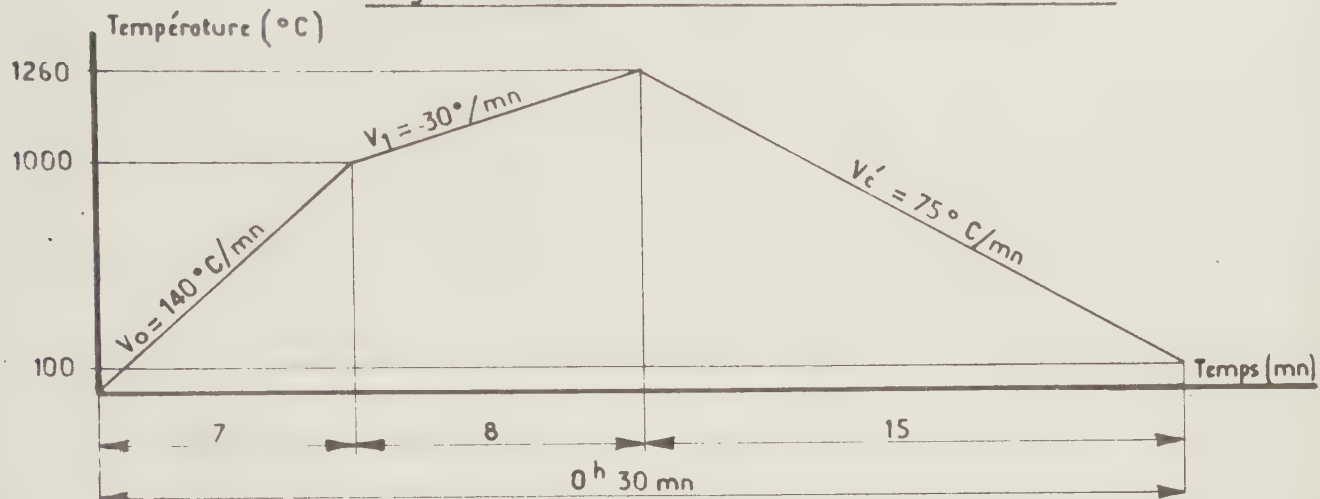


Fig. 2 Assiette de faïence - cuisson d'émail

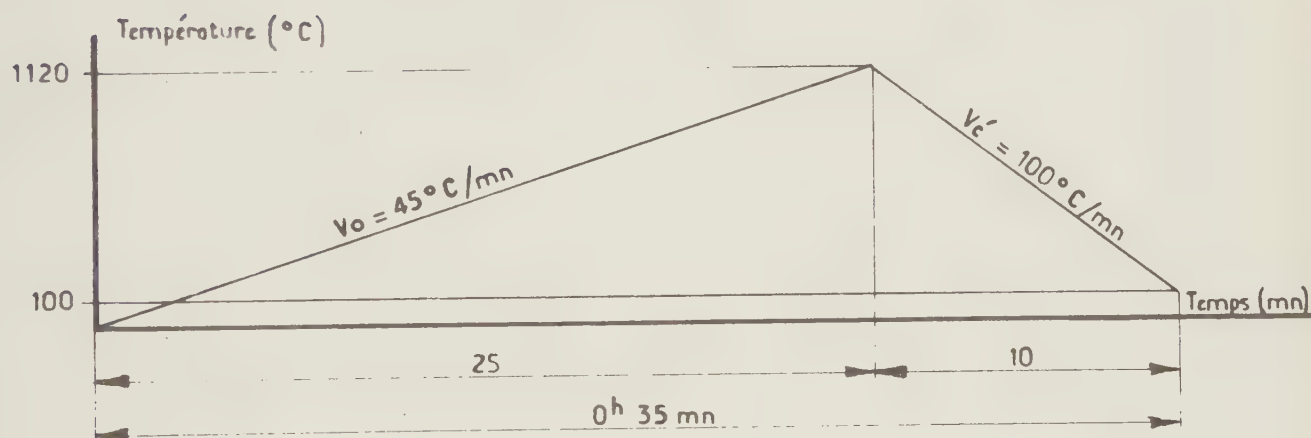
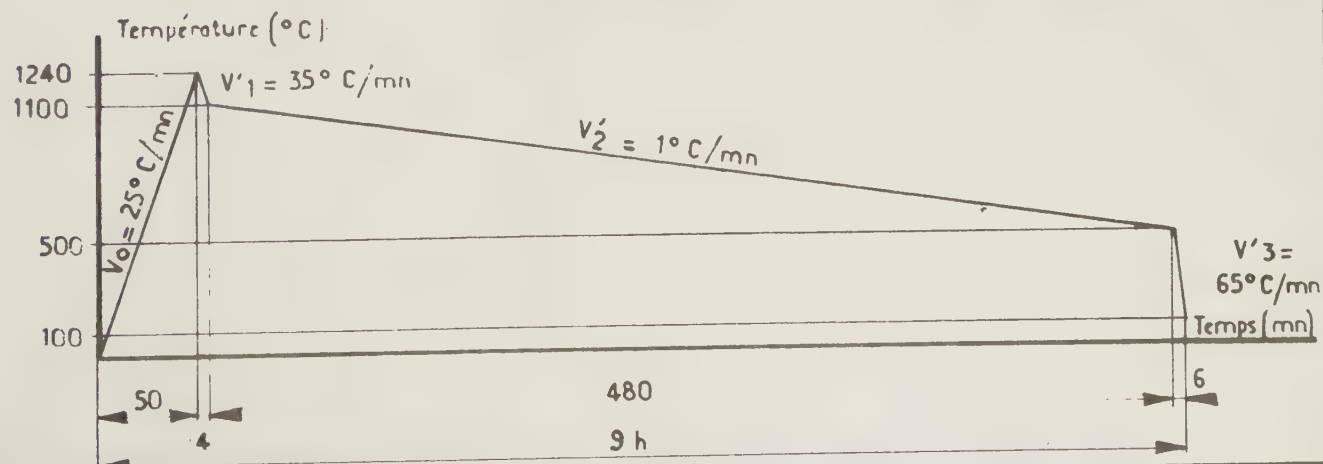
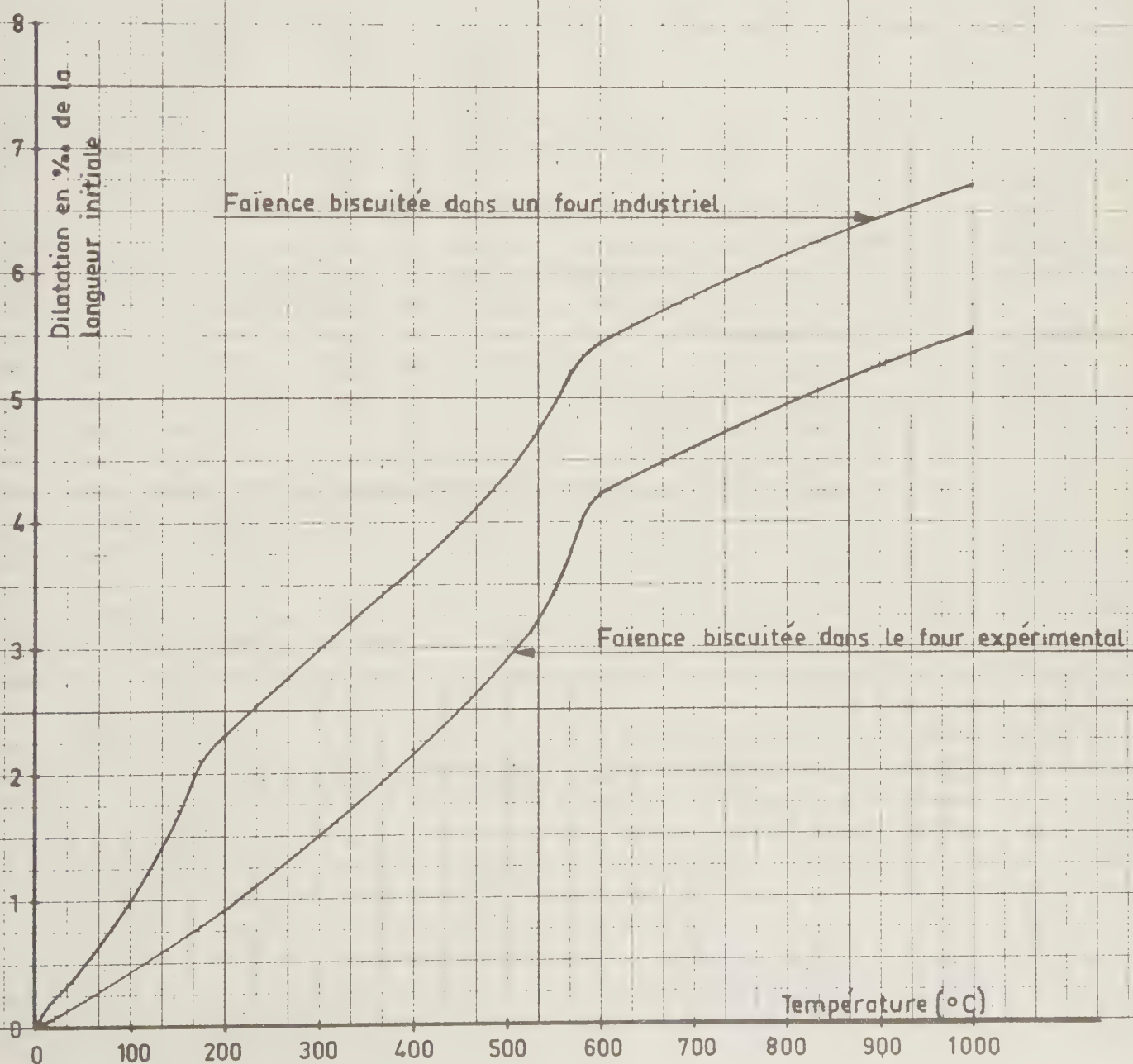


Fig. 3 Carreau de grès - Monocuisson



EXPÉRIMENTATION SUR FAÏENCE

Courbes de dilatation sur cuit



EXPÉRIMENTATION SUR GRÈS

Fig. 1 Courbe de dilatation-retrait

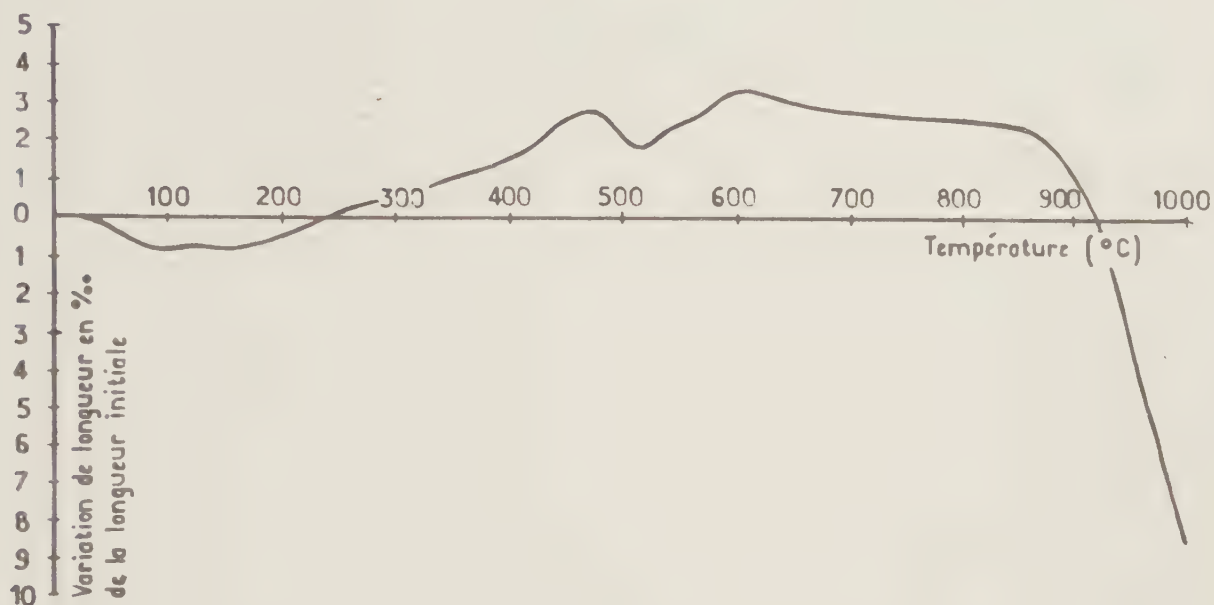
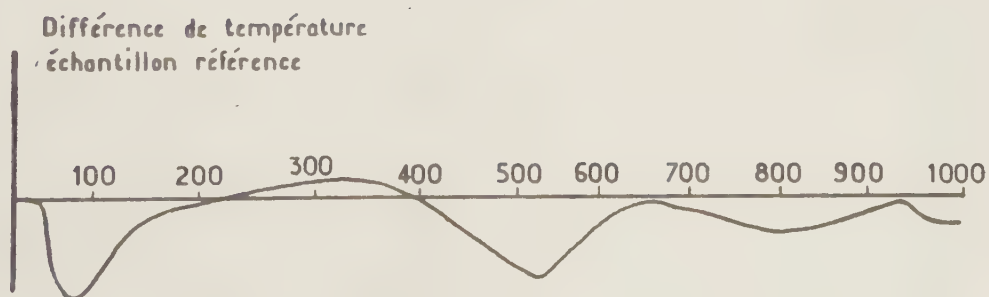


Fig. 2 Courbe d'analyse thermique différentielle





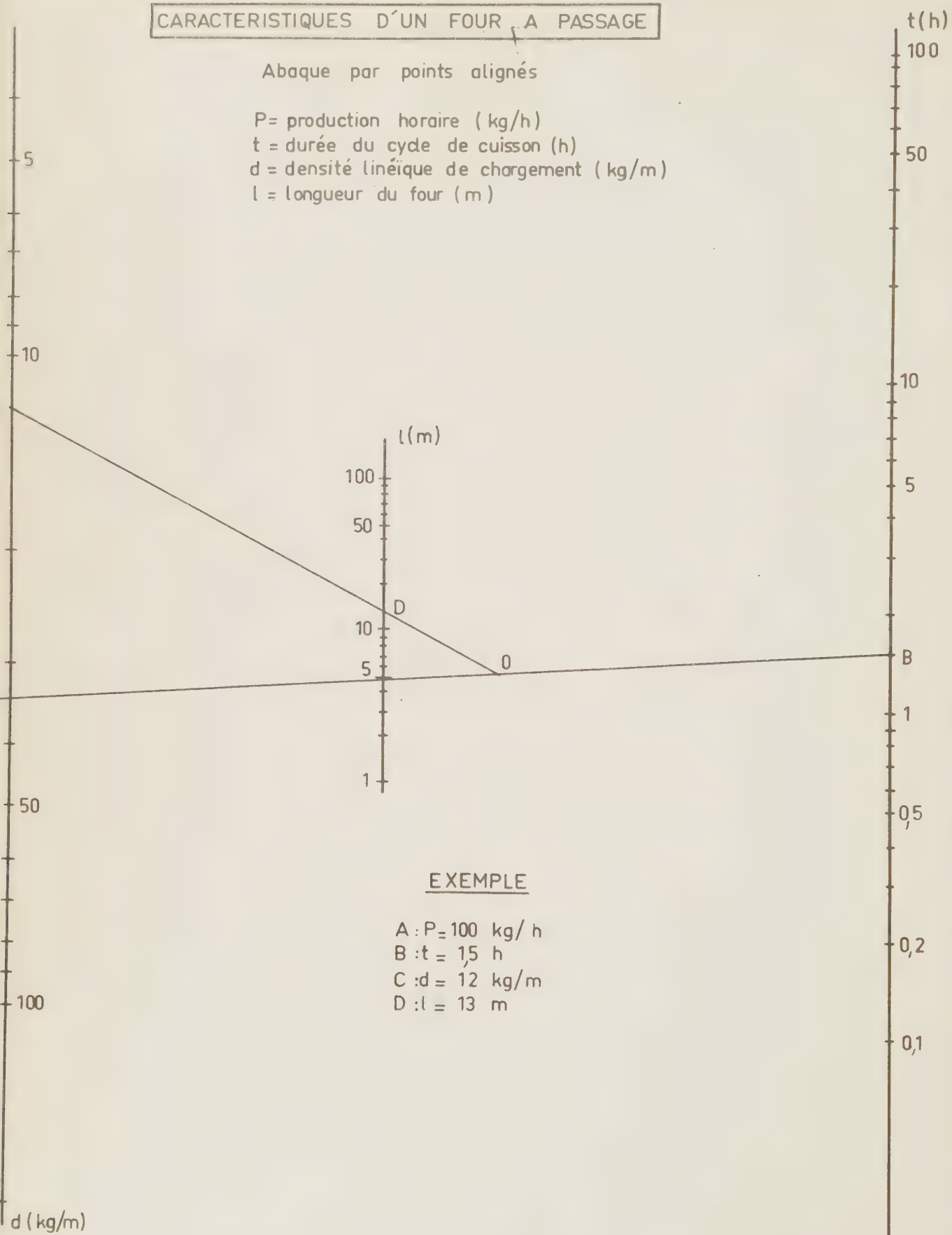
CARACTERISTIQUES D'UN FOUR A PASSAGE

Abaque par points alignés

 P = production horaire (kg/h)

 t = durée du cycle de cuisson (h)

 d = densité linéique de chargement (kg/m)

 l = longueur du four (m)


DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

Etude de la diffusivité thermique des solides

Vu et approuvé

Paris, le 1er juillet 1969

Le Doyen de la Faculté des Sciences
de Paris

Marc ZAMANSKY

Vu
et permis d'imprimer

Le Recteur de l'Académie de Paris

Jean ROCHE

